UR5LCV И.Л.Зельдин
UR8LA В.Г.Марцын
UR5LAC В.В.Моргуль
WY6DX В.Г.Трясоруков



# HF AMPLIFIERS

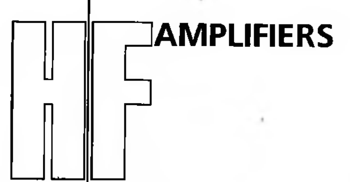
## ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА







*UR5LCV* И.Л.Зельдин
*UR8LA* В.Г.Марцын
*UR5LAC* В.В.Моргуль
*WY6DX* В.Г.Трясоруков




# ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

Харьков
«Торнадо»
2001

# СОДЕРЖАНИЕ

# ПРЕДИСЛОВИЕ

***Уважаемый читатель!***

**Идея написания этой книги возникла в начале 2001 года, после того, как я решил сделать казавшийся мне предельно простым усилитель на четырех лампах Г-811 вместо ранее используемого в течение 15 лет усилителя на ГУ-74Б. Привлекало то, что в Г-811 не надо использовать интенсивный обдув ламп, отсутствие источников экранного и сеточного напряжений и почти мгновенная готовность усилителя к работе (около 5 сек), вместо трех-четырех минут в усилителе на ГУ-74Б. Сделав новый усилитель, я столкнулся с полным набором проблем, описанных в данной книге, и вопрос их устранения занял почти месяц. Обратившись к харьковским «радио гуру», я выяснил, что методы устранения самовозбуждения в усилителях мощности, выполненных на тетродах или пентодах, сильно отличаются от методов, применяемых к триодам, что и подтвердили дальнейшие поиски в интернете. К сожалению, в ранее издаваемой литературе для радиолюбителей методы борьбы с самовозбуждением на УКВ, рекомендации по монтажу усилителей и выбор элементов были описаны не слишком подробно, что и порождает постоянно возникающие вопросы у радиолюбителей при проектировании и изготовлении усилителей мощности.**

**В связи с этим мной был привлечен авторский коллектив, состоящий из профессиональных радиоинженеров, чей многолетний опыт работы в эфире позволял грамотно и доходчиво изложить практический смысл данной книги. Используя в качестве основного источника информации интернет и профессиональную литературу, авторский коллектив выносит на Ваш суд это первое совместное издание, в котором участвовали UR5LAC — Владимир Моргуль, WY6DX (ex. UY5DX) — Владимир Трясоруков, UY5DP — Юрий Тупицын и UR8LA — Вадим Марцын. Авторы также выражают признательность за советы и рекомендации по созданию данной книги UT5TA — Борису Андрющенко, UT5TC — Юрию Петрову и UY1LA — Сергею Сало.**

**Мы будем также признательны всем радиолюбителям за комментарии, советы и дополнения к данному изданию.**

***С наилучшими пожеланиями, от авторского коллектива***

**UR5LCV — Игорь Зельдин**
**Президент Лиги радиолюбителей Украины.**

# ВВЕДЕНИЕ

## УСТРОЙСТВО И РАБОТА ЛАМП

В электронных лампах катод излучает электроны. Т. к. электроны имеют отрицательный заряд, а противоположные заряды взаимно притягиваются, то они притягиваются положительным напряжением, приложенным к аноду. Если на их пути нет других электронов, то основной ток течет между анодом и катодом.

Термин «сетка» описывает вид, а не действие. Сетка выполнена из большого количества проводов или стержней — как птичья клетка, и расположена вблизи катода. Поэтому сетка оказывает большее влияние на электроны возле катода, чем далеко расположенный анод. Таким образом, небольшое изменение напряжения на сетке вызывает большие изменения в потоке электронов и, соответственно, тока анода. Из-за того, что напряжение, приложенное к сетке, управляет потоком электронов от катода к аноду, сетка работает как «вентиль» или «заслонка». Фактически сетке не требуется ток для управления, и поэтому усиление мощности в лампе с сеткой относительно велико.

В связи с тем, что одноименные заряды отталкиваются, достаточно большое отрицательное напряжение на сетке может остановить электроны на их пути к аноду. При уменьшении отрицательного потенциала на сетке поток электронов к аноду увеличивается. Другими словами, повышение напряжения на сетке вызывает увеличение потока электронов от катода к аноду. Обратное утверждение также справедливо: увеличение отрицательного напряжения на сетке уменьшает поток электронов от катода к аноду. И до тех пор, пока сетка остается отрицатель-

ной по отношению к катоду, соотношение между напряжением сетка—катод и током анода остается приблизительно линейным. Если между анодом и источником анодного напряжения включен нагрузочный анодный резистор, то изменения тока анода под воздействием напряжения на сетке создают пропорциональные, обычно намного большие, изменения напряжения на этом резисторе. Отношение изменения напряжения на нагрузочном резисторе к изменению напряжения на сетке называется коэффициентом усиления и обозначается μ (мю). Так как μ больше при более высоком анодном напряжении, средняя величина μ является более употребительной, чем максимальное μ.

В мощных радиолампах применяются катоды двух типов: прямого и косвенного накала. Каждый из этих типов имеет свои преимущества и недостатки. Например, катоды косвенного накала цилиндрической или планарной конструкции имеют существенно меньшую индуктивность и способны работать на гораздо более высоких частотах, чем катоды прямого накала. Катоды прямого накала обычно разогреваются до рабочей температуры за одну-две секунды, а катоды косвенного накала — от одной до трех-пяти минут. Катоды требуют к себе «уважительного отношения», поэтому особым объектом внимания должны быть напряжение и пусковой ток накала, которые прямо связаны с долговечностью катода.

Для продления срока службы лампы с катодом прямого накала напряжение накала необходимо установить на уровне чуть большем того, при котором начниается уменьшение выходной мощности. Со временем, при старении лампы, это напряжение можно повышать до восстановленил необходимого уровня выходной мощности. Использование такого приема дает возможность продлить срок службы лампы в несколько раз. По данным фирмы Eimac®, увеличение напряжения накала на 3% сокращает срок службы на 50%. С другой стороны, для ламп с подогревателем уменьшение напряжения накала ниже определенного уровня может привести к осыпанию эмиссионного слоя катода и закорачиванию промежутка сетка-катод. Повышение же напряжения накала может вызвать частичный перенос эмиссионного слол на сетку, а также на другие детали конструкции лам-

пы, что в дальнейшем может привести к прямой эмиссии сетки при ее нагреве в режиме передачи, а это повлечет за собой падение тока катода и сокращение срока службы лампы. Индикатором этого является прогрессирующее падение мощности в режиме максимального сигнала через несколько секунд после начала передачи. Регулировку напряжения накала легко сделать включением последовательно в цепь низкоомного реостата необходимой мощности.

Сопротивление нити накала в холодном состоянии в несколько раз меньше, чем при рабочей температуре. Поэтому весьма желательно ограничение пускового тока на уровне не более удвоенного рабочего. При проектировании и эксплуатации усилителя необходимо также учитывать разницу в напряженни питающей сети при приеме и передаче, которая может составлять от 5 до 25%.

## УСИЛЕНИЕ СИГНАЛОВ

Термин «усиление электрического сигнала» может быть сформулирован как «процесс созданил увеличенной копни входного сигнала с использованием энергии источника питания» и, в частности, величины напряжения и тока входного сигнала без существенного изменения других параметров. Синусоидальный сигнал является единственным периодическим сигналом, который не содержит гармоник. Вся энергия синусоидального сигнала сосредоточена на основной частоте. Другими словами, чистая синусоида является когерентной. Сохранение «чистоты» синусоидальных сигналов в процессе усиления является основным требованием при разработке и эксплуатации усилителей.

Время протекания анодного тока за период колебания определяет класс усиления усилителя. Период протекания тока 360° ($2\pi$) обозначает, что ток анода существует в течение 100% периода входного синусоидального сигнала. Период протекания тока 90° ($\pi/2$) обозначает, что ток анода существует в течение 25% периода входного синусоидального сигнала. Большие углы протеканил тока дают более линейное воспроизведение входного синусои-

дального сигнала. Меньшие углы увеличивают к.п.д., но уменьшают линейность. При углах, меньших 360°, отсутствующая часть синусоиды должна быть чем-то дополнена. Одним из методов дополнения является использование свободных колебаний выходного контура, а другим — использование двухтактной схемы. В этом случае каждая лампа проводит ток хотя бы половину периода, и таким образом синусоидальный сигнал воспроизводится довольно точно.

## КЛАСС А

Класс А является наиболее линейным при усилении сигналов. Усияители класса А дают искажения только в $10^{-5}$ иян $-50$ *дБ*. Теоретический к.п.д. усилителя класса А — 50%. Практически он несколько меньше. Класс А используется, в основном, в усилителях слабых сигналов — там, где к.п.д. не имеет большого значения. Колебательный контур в такой схеме может и ие использоваться, так как усилитель проводит ток в течение всего периода колебания (360°). Класс А является идеальным для широкополосного усияения. Начальный ток анода ($I_{нач}$) в классе А для большинства ламп устанавливается, как правило, равным приблизительно половине максимального анодного тока. Измерительный прибор в цепи анода будет показывать постоянную величину анодного тока, хотя сигнал будет изменяться от начального значения до максимального. Максимально достижимая мощность в режиме класса А приблизительно равна максимальной мощности, рассеиваемой на аноде лампы.

## КЛАСС АВ

В мощных усилителях класс АВ обычно подразделяется на два подкласса: АВ1 и АВ2.

Усилитель класса АВ1 имеет большее смещение на сетке и, соответственно, больший к.п.д. — около 60%. Платой за это является увеличение искажений приблизительно до $10^{-4}$, или $-40$ *дБ*.

Анодный ток в режиме класса АВ1 изменяется пропорционально сеточному напряжению в течение около 60% периода входного сигнала и отсутствует около 40% периода. Отсутствующая часть периода входного сигнала восполняется свободными колебаниями в выходной колебательной системе.

При работе усилителя в режиме класса А или АВ1 напряжение на сетке изменяется в области отрицательных значений до 0 *В*. Максимальное мгновенное значение анодного тока, амплитудв напряжения и максимальнал пиковая выходнал мощность совпадают с нулевым напряженнем на сетке. Напряженне на сетке не должно становиться положительным, т. к. в этом случае появляется сеточный ток и линейное соотношение между сеточным напряжением и анодным током нарушается. В отсутствие сеточного тока в режимах класса А или АВ1 мощность для раскачки усилителя требуется только для перезаряда входной и паразитной монтажной емкостей, а уровень мощности для раскачки усилителя в режиме класса АВ1 на КВ диапазонах составляет 1÷2% от выходной, и коэффициент усиления по мощности составляет от 50 до 100. При увеличении рабочей частоты возрастают потери в проводниках из-за наличия скин-эффекта и на перезаряд емкостей, что приводит к необходимости увеличения мощности раскачки. Это явление хорошо известно коротковолновикам: мощность передатчика на ВЧ диапазонах уменьшается. Драйвер (обычно это трансивер) требует резистивной нагрузки, поэтому имеющуюся емкостную составляющую необходимо компенсировать. Начальный ток анода устанавливается обычно на уровне 20% максимального тока при испытании однотоновым сигналом.

Лампы, предназначенные для работы в классах А и АВ1, должны иметь большой импульс анодного тока при нулевом напряжении на сетке. Обычно он раза в три превышает максимально допустимый средний ток анода. Большинство ламп, используемых в этих режимах в ВЧ усилителях класса АВ1, — тетроды и пентоды, т. к. они имеют при такой схеме включения относительно большой коэффициент усиления. Триоды используются

намного реже из-за небольшого μ (обычно 2÷5) в лампах с большим импульсом анодного тока. В связи с тем, что у большинства трансиверов искажения составляют менее − 36 *дБ*, такой усилитель практически не добавит искажений.

Чаще всего класс АВ1 используется в схеме включения с общей сеткой и подачей напряжения возбуждения в цепь катода. При работе в классе АВ1 в схемах с общей сеткой предпочтение отдают тетродам и пентодам, что позволяет получить большее усиление по мощности.

Класс АВ2 отличается от АВ1 лишь тем, что напряжение возбуждения на сетке заходит в область положительных значений. В этом случае сетка начинает притягивать и ускорять электроны, появляется сеточный ток, в импульсе тока анода образуется узкий провал и, соответственно, уменьшается линейность. Искажения в однотактном усилителе класса АВ2 в схеме с общим катодом достигают $10^{-2}$ или − 20 *дБ*. При усилении SSB сигналов этого достаточно для того, чтобы создать помехи станциям, работающим на соседних частотах. Ограничив ток сетки и добавив в цепь катода резистор отрицательной обратной связи (для получения противофазного напряжения обратной связи на сетке), можно получить достаточную линейность, однако мощность возбуждения при этом необходимо будет увеличить для достижения той же выходной мощности. Такая схема отрицательной обратной связи для повышения линейности часто используется в усилителях на телевизионных лампах строчной развертки, т. к. они предназначены для работы в импульсном режиме, а не для линейного усиления.

В классе АВ2 с общей сеткой и резистором отрицательной обратной связи в катоде линейность увеличивается, а уровень искажений относительно низкий — около − 40 *дБ*. В этом классе включения хорошо работают все лампы с большим и средним значением μ. Максимально допустимый уровень выходной мощности — удвоенное максимальное значение мощности, рассеиваемой анодом.

## КЛАССЫ B, C, D

В классе B лампа проводит ток в течение половины периода колебания (180°), поэтому искажения при усилении SSB сигнала недопустимо велики.

В классе C лампа проводит ток в течение менее половины периода колебания (< 180°), поэтому процесс усилеиия нелинейный. Лампа умышленио переводится в нелииейный режим для увеличения к.п.д. Этот режим используется преимущественно для работы в режимах CW, FSK и FM. Уровень гармоник на выходе высокий, поэтому требуется дополнительнвя фильтрация сигнала. Выходная пиковая мощность может быть в 3÷4 раза больше мощности, максимально рассеиваемой анодом.

Класс D используется преимущественно на низких частотах (до нескольких МГц). Усилитель работает в ключевом режиме. К.п.д. усилителя очень высокий, но необходима особо тщательнал фильтрация выходного сигнала из-за очень большого уровня гармоник, поэтому класс D в ламповых усилителях практически не используется.

# ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

## ТРАНСФОРМАТОРЫ

Сердечники трансформаторов, используемых в источниках питания усилителей мощности, бывают:

- Ш-образные из пластин;
- П- образные из пластин;
- Ш-образные витые (ленточные);
- П-образные витые (ленточные);
- О-образные (тороидальные).

Ш- и П-образные витые сердечники имеют ограниченное применение в связи с тем, что их повторное использование затруднено из-за конструктивных особенностей — отклеивания пластин при механических воздействиях, необходимости устранения магнитных зазоров при сборке и т. д. Наибольшее распространение получили Ш- и П-образные пластинчатые сердечники из-за их доступности и удобства сборки-разборки. Однако наиболее предпочтительным является применение тороидальных сердечников, несмотря на их дефицитность и сложность изготовления обмоток.

Трансформаторы обычно рассчитываются на максимальную мощность в «вольт-амперах» (*ВА*). Максимальная мощность в *ВА* эквивалентна среднеквадратичной мощности в *Вт* (ваттах) при протекании по каждой из обмоток среднеквадратичного тока и подаче на трансформатор номинаьного напряжения с номинальной частотой. При уменьшении сетевого напряжения мощность трансформатора падает.

Для работы SSB и CW трансформатор может иметь габаритную мощность меньше расчетной. Например, в промышленных усилителях мощностью 1500 *Вт* обычно используются высоковольтные трансформаторы габаритной мощностью около 600 *Вт* (или В•А). Такой мощности вполне достаточно для нормальной работы SSB. Допустима также и кратковременная работа FM и RTTY при использовании отвода вторичной обмотки для снижения анодного напряжения. При работе в режиме SSB при модуляции падение напряжения на выходе высоковольтного выпрямителя не должно быть более 10%, в противном случае необходим более мощный трансформатор. Следует иметь в виду, что снижение напряжения может происходить также при недостаточной емкости конденсаторов фильтра или при большом сопротивлении проводов питающей сети.

Расчет трансформаторов различных типов неоднократно публиковался в литературе и поэтому здесь не приводится.

## ТОКИ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

Увеличение тока в любом проводнике приводит к квадратичному росту мощности потерь. Т. к. $P = I^2R$, удвоение тока дает четырехкратное увеличение потерь. Это особенно важно учитывать в трансформаторах в связи с тем, что рассеивание этой мощности происходит в обмотке, вызывая ее нагрев. Проблема усугубляется тем, что медь имеет положительный температурный коэффициент сопротивления. Трансформатор нагревается, сопротивление обмоток растет, потери увеличиваются и т. д. до наступления теплового баланса между выделяемым и отводимым в окружающую среду теплом. Плохой отвод тепла от обмоток может привести к перегреву трансформатора и выходу его из строя. Существуют методы расчета тепловых потерь в трансформаторах, однако они весьма приблизительны из-за невозможности учета множества случайных факторов. Однако можно пользоваться простым правилом: после часа работы в эфире с обычной интенсивностью трансформатор не должен быть очень горячим (60÷80° С). Уменьшение нагрузки на трансформатор ощу-

тимо снижает потери. Например, уменьшение тока на 30% уменьшает потери и, соответственно, нагрев обмоток на 50%.

Имеется простой и относительно точный метод для определения тока вторичной обмотки для трансформатора, работающего на выпрямительный мост и емкостный фильтр. Метод базируется на определении сопротивления и напряжения вторичной обмотки трансформатора. Этот метод удобен, когда вам случайно попадается трансформатор с неизвестными параметрами. Необходимо лишь иметь омметр и закорачивающий проводник для первичной обмотки (для исключения появления высокого напряжения при отсоединении омметра). Измеряв сопротивление вторичной обмотки, умножьте полученное значенне на 70, чтобы получить ориентировочное сопротивление нагрузки по постоянному току. Для определения постоянного напряжения на выходе фильтра под нагрузкой умножьте $U_{эфф}$ вторичной обмотки на 1,3. Разделив величину постоянного напряжения на выходе фильтра под нагрузкой на сопротивление нагрузки по постоянному току, получите ориентировочный ток потребления выходного каскада.

Например, вторичная обмотка с $U_{эфф.}$ = 2000 *В* имеет R = 60 *Ом*. Используется мостовой двухполупериодный выпрямитель с емкостным фильтром. Минимальное сопротивление нагрузки для выпрямителя должно быть 70 х 60 *Ом* = 4200 *Ом*. Напряжение под нагрузкой будет около 1,3 х 2000 *В* = 2600 *В*. Следовательно, максимальный ток нагрузки 2600 *В* / 4200 *Ом* = 0,62 *А*.

Чтобы определить ориентировочную емкость фильтра, необходимо 50 000 разделить на минимальное сопротивяение нагрузки. Для вышеприведениого примера 50 000/4200 = 12 *мкФ*.

При использованни двухполупериодного выпрямителя по схеме с удвоением напряжения и емкостным фильтром минимальное сопротивленне нагрузки считаем в 300 раз большим сопротивления обмотки, а выходное напряжение под нагрузкой — в 2,5 раза больше $U_{эфф.}$ Например, при $U_{эфф}$ =1000 *В* и сопротивлении обмотки 10 *Ом* минимальное сопротивление нагрузки будет 300 х 10 *Ом*=3000 *Ом*, а выходное напряжение 2,5 х 1000 *В* = 2500 *В*. Соответственно, максимальный ток нагрузки будет 2500 *В* / 3000 *Ом* = 0,83 *А*. Емкость каждой половины фильт-

ра такого выпрямителя будет равна 200 000, разделенным на минимальное сопротивление нагрузки, т. е. 200 000 / 3000 *Ом* = 67 *мкФ*.

Необходимо учитывать также не только сопротивление вторичной обмотки, но и материвл сердечника. При использовании высококачественной стали потери в сердечнике уменьшаются и допустимый ток нагрузки возрастает. Сопротивленне первичной обмотки тоже необходимо учитывать, т. к. оно включено последовательно с сопротивлением сетевых проводов, и это может вызывать большое падение напряжения в сети, особенно при применении емкостного фильтра.

## ВЫПРЯМИТЕЛИ

В усилителях мощности используются выпрямители следующих типов:

- однополупериодный — может использоваться в схемах, где один из выводов вторичной обмотки заземлен. Недостатки — требуется большал емкость на выходе фильтра, протекание постоянной составляющей по обмотке (подмагничиванне), плохая нагрузочнал характеристика, необходима быстродействующал защита от пробоя обратным напряженнем;
- двухполупериодный со средней точкой — использовался в те времена, когда для выпрямления использовались лампы (кенотроны, газотроны), поэтому трансформаторы изготавливались со средней точкой. Преимущество — можно получать от $^1/_4$ до 2 $U_{пит.}$ при соответствующем включении, недостаток — усложнение трансформатора и его неэффективное использование;
- мостовал схема — преимущества: полное использование трансформатора, возможность использования резонансного фильтра; недостаток — увеличение количества витков по сравнению со схемой удвоения, большее сопротивление обмотки и пропорциональное увеличенне потерь, ужесточение требований к межвитковой и межобмоточной изоляции;
- двухполупериодная схема с удвоением — преимущества: максимальное использование трансформатора, уменьшенное

количество витков вторичной обмотки, пониженные требования к межвитковой и межобмоточной изоляции, низкие пульсации выпрямленного напряжения; недостатки — удвоеннвл по сравнению с мостовой схемой емкость фильтра, т. к. каждая половина емкости заряжается только в теченне одного полупериода входного напряжения, в то время как вторая половнна разряжается. Двухполупериоднал схема с удвоением не используется с резонансными фильтрами.

## СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Существуют два основных типа фильтров: емкостный и Г-образный с индуктивностью (дросселем) на входе и емкостью на выходе. У каждого из них имеются свои преимущества и недостатки.

Емкостный фильтр имеет хорошую переходную характеристику. Его просто изготовить, он компактен, дешев, имеет малый вес и объем. Основным недостатком является то, что конденсатор заряжается только в течение мвлой части периода напряжения вторичной обмотки трансформатора (соотношение времени заряд-разряд может быть 1:10). Поэтому нагрузка на трансформатор резко меняется в течение периода сетевого напряжения, что вызывает повышенные потери в обмотке и питающей сети и требует применения трансформаторов с пониженным сопротивлением обмоток. Старые высоковольтные трансформаторы, рассчитанные на использованне фильтров с входной индуктивностью, в такой схеме неприменимы, т. к. имеют высокое сопротивление обмоток.

Г-образные фильтры бывают резонансными и нерезонансными. В нерезонансном фильтре индуктивность поддерживает постоянным ток во внешней цепи, несмотря на изменения нагрузки, но изменения напряжения могут быть весьма значительными. При замере напряжения стрелочным вольтметром эти колебания напряжения незаметны из-за инерционностн измерительной системы, но при контроле постоянства напряжения осциллографом хорошо видны. Это имеет существенное значе-

ние при усилении однополосных сигналов, т. к. изменения напряжения будут влиять на пиковую выходную мощность и линейность усилителя.

Резонансный сглаживающий фильтр поддерживает относительное постоянство выходного напряжения как при быстрых, так и при медленных изменениях потребляемого тока. Дроссель резонирует с параллельной емкостью. Практически емкость конденсатора подбирается по минимальным изменениям напряжения при изменении нагрузки. Частота резонанса в этом случае получается чуть больше, чем удвоенная частота питающей сети.

Преимуществами резонансного фильтра являются:

- хорошие регулировочные характеристики;
- резкое снижение требований к трансформатору и сети по пиковому току нагрузки;
- меньший нагрев трансформатора;
- трансформатор имеет почти двукратный запас по току.

Недостатками резонансного фильтра являются:

- конденсатор должен иметь рабочее напряжение по крайней мере в три раза выше выходного напряжения выпрямителя (типовое значение 0,1÷0,15 *мкФ* на 7,5÷15 *кВ*);
- для поддержания регулировки в режиме приема при росте выходного напряжения выпрямителя необходимо, чтобы через дроссель проходил ток. Обычно начальный ток составляет 10% от максимального, поэтому при возрастании напряжения на 50% при приеме начальный ток может быть уменьшен до 0,5% от максимального;
- дроссель имеет большие размеры, вес и стоимость;
- фильтр с резонансной индуктивностью обычно производит шум (сильно гудит), и его необходимо акустически изолировать.

Резонансные фильтры широко применяются производителями промышленных и военных усилителей. В связи с тем, что таким фильтрам нужна меньшая пиковая мощность от сети, чем емкостным, нагрузка на сеть выравнивается, что особенно важно при слабой проводке. Такие фильтры также предпочтительнее при работе с такими видами излучения, как RTTY, FM и AM.

## КОНДЕНСАТОРЫ ФИЛЬТРОВ

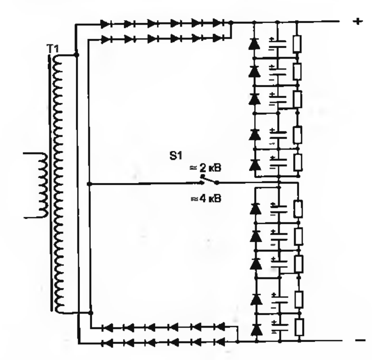
Конденсаторы фильтров обычно имеют максимально допустимый ток переменной составляющей. Этот ток для конденсаторов сетевых фильтров должен быть, по крайней мере, не менее максимального тока блока питания. Высококачественные конденсаторы изготавливаются с минимвльным эквивалентным последовательным сопротивлением. Мвлал величина этого сопротивления соответствует большому допустимому току переменной составляющей.

Конденсаторы с масляной пропиткой диэлектрика бывают двух типов: фильтровые (для источников питания) н импульсные. Импульсные изготавливаются из условия получения максимальной емкости в заданном объеме. Для уменьшения объема в качестве обкладок используется очень тонкая металлическая фольга, что приводит к увеличению минимального эквивалентного последовательного сопротивления и дополнительным потерям и нагреву конденсаторов. Такие конденсаторы можно использовать в фильтрах до 60% максимально допустимого напряжения. При большем напряжении необходимо проверить температуру нагрева конденсатора при длительной работе.

В высоковольтных фильтрах используются также электролитические алюминиевые конденсаторы. Их преимуществами являются небольшой объем и вес (по сравнению с масляными), но они имеют довольно большой ток утечки и очень чувствительны к нагреву, имеют большой разброс по емкости, а после длительного хранения нуждаются в формовке. Кроме того, их максимальное рабочее напряжение относительно невелико. Поэтому при использовании их в фильтре высоковольтного выпрямителя необходимо последовательное включение цепочек из последовательно включенных конденсаторов (с соответствующим увеличением емкости каждого конденсатора). Параллельно каждому конденсатору необходимо подключить резисторы с одинаковым сопротивленнем для выравнивания напряжения при разбросе емкостн **(рис.1).**

Обратный ток быстро выводит из строя электролитические конденсаторы. Это происходит при пробое выпрямителя, и для защиты конденсаторов параллельно выводам каждого из них

Переключаемый трансформаторный источник питания без отводов по первичной или вторичной обмотке




1. Диоды 1 кВ, 3 А.
2. Резисторы - 100 кОм, 3Вт, металлопленочные.
3. Электролитические конденсаторы 330пФ, 450 В.
4. Трансформатор T1: напряжение на ненагруженной вторичной обмотке около 1414 В.
5. Реле S1- вакуумное или высоковольтный керамический переключатель.

Принцип работы.

Если S1 разомкнут, схема работает как двухполупериодная мостовая и Ua=2кВ для CW, RTTY, и FM.

Если S2 замкнут, схема работает как двухполупериодный удвоитель и Uвых=4кВ для SSB, но с меньшим средним потребляемым током.

Включать S1 при работе усилителя нельзя.

*Рис. 1*

необходимо подключить диод обратной полярностью с допустимым обратным напряжением, бо́льшим чем рабочее напряжение конденсаторов.

## РЕГУЛИРОВКА АНОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В усилителях мощности желательно иметь возможность регулировки выходной мощности. Можно, например, уменьшать одновременно анодное напряжение и ток таким образом, чтобы сопротивление нагрузки для лампы (или ламп) существенно не менялось и выходной контур работал с расчетным *Q* как при большой, так и при малой мощности. Уменьшать напряжение и ток можно переключением отводов первичной обмотки. Однако этот метод не эффективен, т. к. необходимо увеличивать количество витков первичной обмотки, уменьшать диаметр провода и, соответственно, увеличивать потери. Более эффективным методом является переключение отводов вторичной обмотки трансформатора с помощью обычного керамического переключателя и ***обязательно*** при отсутствии нагрузки.

Если в трансформаторе отсутствуют отводы вторичной обмотки, можно уменьшать выходное напряжение на 50% переключением схемы выпрямителя с двухполупериодной с удвоением напряжения на двухполупериодную мостовую. Все, что для этого необходимо — высоковольтный выключатель или вакуумное реле, два конденсатора фильтра и 4 линейки выпрямителей. Например, блок питанил может давать 4000 *В* для работы SSB и 2000 *В* для работы RTTY, CW или FM. При снижении напряжения в 2 раза ток потребления можно удвоить для работы FM и RTTY из-за большей длительности непрерывно излучаемой мощности. Переключение выходного напряжения желательно производить при полностью выключенном блоке питания. Допускается только снижение напряжения без выключения блока в режиме приема (рис. 1).

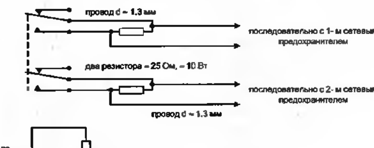
## ПУСКОВОЙ РЕЖИМ БЛОКА ПИТАНИЯ

Для большинства блоков питания полезно ступенчатое включение. Чтобы установить такую схему в блок питания усилителя с

мощностью ≅1500 *Вт*, необходимо реле с двумя парами нормально разомкнутых контактов, рассчитанными на ток до 10 *А* (или с переключающими контактами) и два резистора на 25 *Ом*/10 *Вт*. Цепь включается последовательно с сетевыми предохранителями или выключателем сети. При таком включении накал, высокое и низкие напряжения будут включаться мягко, что значительно увеличит надежность и долговечность усилителя **(рис.2)**.

Ступенчатое включение

Схема ступенчатого включения для типового усилителя 1500 Вт




Конденсатором задержки включения служит высоковольтный конденсатор фильтра.
Контакты реле должны быть рассчитаны на ток до 10А, этого достаточно для усилителя мощностью 1500 Вт.
Подберите R таким, чтобы реле включалось при достижении высоковольтным напряжением 2/3 от максимального.
Обычно R = 1/2 сопротивления обмотки реле.
Время включения реле 1± 0,5 сек.

*Рис. 2*

## СЕТОЧНОЕ СМЕЩЕНИЕ

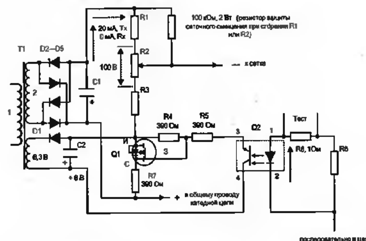
При работе ламп в различных режимах и схемах включения требования к источникам напряжения смещения различны.

В связи с тем, что сеточная цепь при работе лампы в режиме AB1 с заземленным катодом практически не потребляет тока, легко применить непрерывное регулирование напряжения смещения. Обычно напряжение смещения при приеме должно быть на 50% выше, чем при передаче. Для переключения можно использовать высоковольтный МОП-транзистор, управляемый оптопарой. Источник напряжения смещения не должен иметь очень большое выходное сопротивление. Максимальное сопротивление сеточной цепи рекомендуется производителями ламп и лежит в пределах от 1 до 100 *кОм*.

При использовании режима AB1 в усиянтелях с заземленной сеткой рабочего смещения, получаемого с помощью стабилитрона, отсутствует возможность его оперативного изменения при замене ламп. Одним из решений является применение цепочки последовательно включенных в прямом направлении выпрямительных диодов. Меняя количество этих диодов (например, с помощью переключателя), можно изменять напряжение смещения с шагом около 0,7 *В*. Традиционно для изменения напряжения смещения при переходе из режима приема в режим передачи используются реле. В настоящее время имеется возможность использовать в этих целях оптроны с транзисторным ключом (т. е. электронный переключатель напряженил смещения), которые надежнее, дешевле, работают бесшумно и имеют большее быстродействие (рис. 3).

Существуют два метода включения электронных переключателей напряжения смещения: ВЧ напряжением или током катушки реле переключения антенны. Включение ВЧ напряжением имеет недостаток, заключающийся в том, что усилитель может быстро переключаться между линейным и нелинейным напряжением смещения во время мягко произносимых слогов, и это приводит к «отрывистому» звучанию и расширению излучаемой полосы (т. н. «сплеттерам»). В случае управления переключени-

## Регулятор напряжения смещения в усилителе классе AB1




C1 ~ 20 мкФ, напряжение ≥ 1,2U2xx
C2: ~ 200мкФ, 16В
D1: ≥ 50 В, 1А, 1N4002 или подобные
D2,D3,D4,D5: Uобр ≥ 1,5 U2, Iпр ≥ 1А
Q1: мощный N-канальный МОП, Ic~1А, Uси≥ 1,2U2xx
Q2: оптрон PS2505-1 или подобный
R1:определяется как R1=[ U на C1 при нагрузке 20ма минус (напряжение на сетке в момент передачи плюс 50В)] / 0.02А. Мощность ≥ 0.02А x 0.02А x Rистока
R2: 5 кОм ≥ 2Вт
R3: подбирается, чтобы падение напряжения на R2 составляло 100В (или ток через R1 и R2 - 20 мА)
R6: подбирается в зависимости от тока обмотки реле и тока через диод оптрона
T1: напряжение на обмотки 2 должно обеспечить достаточное напряжение для запирания лампы:
U2= 1,25x Uсмещения необходимое

<u>Принцип работы.</u>

Когда на затворе Q1 нулевой потенциал, транзистор Q1 закрыт (R = бесконечности). При подаче положительного напряжения на затвор сопротивление Q1 становится низким. Во время приема, когда не протекает ток через катушки переключающих реле прием передача, оптрон Q2 выключен, Q1 также не работает, и ток через резисторы R1,R2,R3 не протекает. В связи с тем, что напряжение смещения сетки велико, не имеет значения, где установлен резистор R2. отсекающий анодный ток лампы.

При передаче ток протекает через катушки реле прием-передача, включается оптоизолятор и подает положительное напряжение на затвор Q1, и как следствие сопротивление Q1 становится низким. Это вызывает протекание тока около 20 мА через R1, R2 R3, вызывая падение напряжения на этих резисторах. В связи с этим в момент передачи напряжение смещения сетки уменьшается — это и является регулировкой. Напряжение смещения сетки должно быть настроено так, чтобы в момент максимальной раскачки сеточный ток был около нуля.

*Рис. 3*

Регулировка напряжения экранной сетки

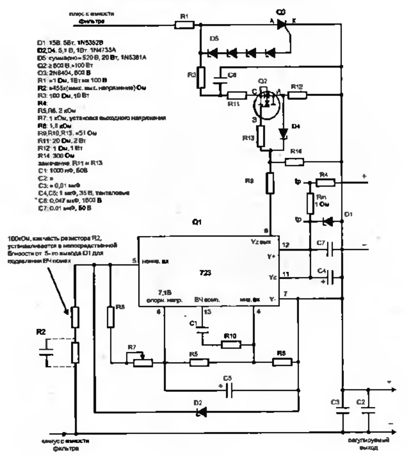



*Рис. 4*

ем с помощью тока катушки реле переключения антенны это явление не наблюдается. Такое управление можно осуществлять также посредством оптопары. При этом ток катушки реле включает входной светодиод оптрона, а выходной транзистор управляет ключом напряжения смещения.

## ПИТАНИЕ ЭКРАННОЙ СЕТКИ

Номенклатура выпускаемых промышленностью мощных тетродов и пентодов, которые хорошо работают в схеме с общим катодом в классе АВ1, весьма широка. Существенным критерием выбора может служить способность лампы выдерживать при нулевом напряжении на управляющей сетке пик анодного тока, превышающий средний не менее, чем в три раза. В большинстве случаев это происходит при напряжении экранной сетки, близком к максимально допустимому.

Для повышения линейности усиления необходима регулировка напряжения на экранной сетке. Для ламп относительно невысокой мощности можно использовать шунтовый регулятор со стабилитронами. Включив последовательно в цепь сетки линейку из стабилитронов с различными напряжениями стабилизации (от 10 до 30 *В*, мощностью 5 *Вт*) и переключая их, можно регулировать напряжение. Для более мощных ламп следует применять плавный регулятор последовательного типа. Современные высоковольтные МОП транзисторы и интегральные стабилизаторы позволяют легко это сделать **(рис. 4)**.

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ

## ЗАЩИТА АНОДНОЙ ЦЕПИ ОТ ПЕРЕГРУЗКИ

При случайном замыкании в анодной цепи разрядный ток конденсаторов высоковольтного выпрямителя может достигать весьма высоких значений (до 1000 *А*) и вызвать повреждение деталей усилителя. Для ограничения этого тока в цепи питания анода после конденсаторов фильтра включается последовательно проволочный резистор 10 *Ом* / 10 *Вт*. При напряжении анодной цепи более 3 *кВ* и токе больше 1 *А* необходимо включить два таких резистора последовательно. Лучше всего для этой цели использовать остеклованные резисторы большой длины. Фирма Eimac® еще с 1985 г. рекомендует использовать для защиты цепи анодного питания такие резисторы. Производственное объединение Svetlana® также рекомендует применять резисторы от 10 до 25 *Ом*.

При монтаже таких резисторов необходимо предусмотреть достаточно свободного пространства вокруг них для хорошего охлаждения и исключения высоковольтного пробоя. При отсутствии достаточного пространства близлежащие детали шасси и корпуса необходимо тщательно электрически изолировать. Простейшим методом защиты измерительного прибора является его шунтирование одним или несколькими последовательно включенными кремниевыми диодами (анодом к плюсу прибора). Иногда необходимо включить встречно-параллельные цепочки, в зависимости от падения напряжения на приборе (примерно один диод на каждые 0,5 *В* падения напряжения на приборе). Диоды

должны выдерживать достаточный импульс тока, поэтому маломощные не годятся. Подобную защиту прибора можно предусмотреть и в сеточной цепи.

## ЗАЩИТА ЛАМП С КОСВЕННЫМ НАКАЛОМ

Высоковольтная дуга может вывести из строя лампу косвенного накала. Происходит это следующим образом. В некоторых усилителях один из выводов подогревателя заземлен, а катод подключен к минусу анодного напряжения. При пробое анодного напряжения на катоде появляется высокое напряжение и, как минимум, пробивает промежуток между катодом и заземленным накалом. Иногда сгорает нить накала, а иногда пробивается промежуток катод-сетка. В любом случае лампа выходит из строя. Следовательно, непосредственное заземление одного из выводов нити накала создает предпосылки для пробоя между катодом и накалом. Вместо этого можно соединить один из выводов накала с катодом через дроссель с индуктивностью ≥ 40 *мкГн*, не заземляя выводы накала. В этом случае напряжение между катодом и накалом не достигнет опасного уровня.

## ШУНТИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЦЕПЕЙ

Для защиты от поражения электрическим током в промышленных усилителях применяются различные методы и средства как электромеханические, так и схемотехнические. Обычно при любой попытке открыть корпус устройство защиты автоматически заземляет высоковольтные цепи. Если корпус открывается до того, как разрядились высоковольтные конденсаторы фильтра, усилитель может быть поврежден. В большинстве усилителей единственной цепью протекания тока от минуса высокого напряжения к земле является прибор для измерения анодного тока и его шунт. Даже если на конденсаторах останется 200 *В*, при замыкании они попадают на прибор и, при отсутствии защитных диодов, он будет выведен из строя. В цепь заземления вы-

сокого напряжения можно включить параллельно два проволочных резистора величиной 1÷5 *кОм* для ограничения тока разряда, тогда даже при выходе из строя одного из резисторов другой будет выполнять функцию защиты **(рис. 5)**.

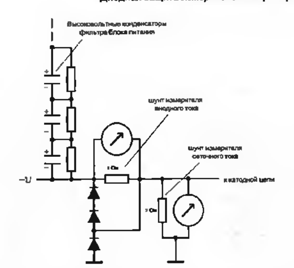
## ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

Предохранители, как и любые радиодетали, имеют предельно допустимые токи и напряжения. Максимальное рабочее напряжение особенно важно в высоковольтных цепях. При использовании случайных предохранителей, не расчитанных на высокие напряжения, все работает хорошо до возникновения аварийной ситуации. Когда при резком возрастании тока предохранитель расплавляется, капли расплава оседают на внутренней поверхности, создавая условия для пробоя высоким напряжением, и предохранитель функцию разрыва цепи не выполняет. Иногда предохранитель может даже взорваться, повреждая близлежащие детали устройства. Поэтому желательно использовать предохранители, предназначенные для применения в высоковольтных цепях. Особо необходимо отметить плавкие вставки, которые заполнены сухим песком. Они имеют повышенное быстродействие и более устойчивы к высоким напряжениям.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Предельно допустимые параметры различных типов полупроводниковых приборов определяются по-разному. Некоторые из них достижимы, а некоторые — нет. Например, максимально допустимые параметры мощных транзисторов и диодов, предназначенных для широкого применения, не могут быть реализованы, если каким-то образом не поддерживать температуру корпуса 25° С. При использовании полупроводниковых приборов, предназначенных для применения в специальной аппаратуре, те же параметры обычно гарантируются до температуры

Диодная защита измерительных приборов




В момент пробоя высокого напряжения на землю или прерывистой паразитной УКВ генерации импульс отрицательного высокого напряжения относительно шасси достигает нескольких киловольт. Это напряжение может вывести из строя компоненты усилителя или лампы.

Например, это может вызвать замыкание катода с накалом или сетки с катодом в лампах с косвенным накалом типа 8877, 3CX800A7 (ГУ-74Б). Дуга, возникающая при пробое, может сжечь накал или повредить катод.

Эти и другие проблемы могут быть предотвращены применением диодной защиты, показанной на рисунке.

В момент пробоя три диода ограничивают импульс отрицательного высокого напряжения, примерно 4,5 В. При этом диоды защищают измерители анодного и сеточного токов так же хорошо, как и их шунтирующие резисторы от бросков тока. Максимальное прямое падение напряжения на диода не должно превышать 0,5В.

Несмотря на то, что усилительные лампы с прямым накалом не страдают от выгорания накала в момент пробоя, подобные защитные диоды все равно желательно применять, так как они защищают измерительные цепи и изоляцию в накальном трансформаторе от типичного высококиловольтного отрицательного импульса в момент пробоя.

Основные рекомендации к схеме.

Соединить три диода последовательно. Общий вывод (минус) нижнего диода соединить с отрицательным выводом высоковольтного конденсатора фильтра. Оставшийся конец диодной цепи соединить с землей. От минуса нижнего диода сделать перемычку к шунтирующим резисторам измерителей анодного и сеточного тока. Таким образом, два последовательных диода параллельны шунту измерителя анодного тока, и один диод параллелен шунту измерителя сеточного тока. Если сопротивление шунтирующего резистора в приборе измерения анодного тока менее чем 0,5 Ом, а максимальный анодный ток 1А, то одного параллельного диода будет достаточно.

*Рис 5*

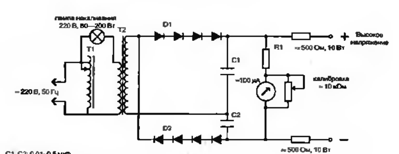
50° С. Реально допускается безопасная работа при снижении максимальных значений не менее, чем на 30%.

Обратное пробивное напряжение выпрямительных диодов у различных экземпляров даже одного типа несколько отличается. Хорошей мерой предосторожности для повышения надежности работы выпрямителя является измерение обратного пробивного напряжения диодов. Напряжение пробоя определяется по возрастанию обратного тока диода до 1÷2 *мкА*. Дальнейшее повышение напряжения приводит к выходу диода из строя. Рост рабочей температуры снижает напряжение пробоя.

Для измерения обратного пробивного напряжения диодов можно применить испытательный прибор, сделанный как высоковольтный омметр с изменяемым напряжением измерения. Конечно, он не показывает непосредственно сопротивление цепи в омах, но зато является очень полезным инструментом. С его помощью можно испытывать вакуумные, блокировочные, разделительные конденсаторы, вакуумные реле, КПЕ, выпрямители, изоляцию высоковольтных цепей. Изготовлеиие и ремонт ламповых усилителей мощности без такого прибора равносильны попытке пересечь океан без навигационных инструментов. Для большинства любительских применений максимальное рабочее напряжение компонентов не превышает 15 *кВ* постоянного и 9 *кВ* амплитуды переменного ВЧ напряжения, поэтому прибор должен быть расчитан на работу с напряжением до 15 *кВ*.

Изготовить такой прибор не представляет особого труда. Для этого необходим маломощный высоковольтный трансформатор, ЛАТР, лампа накаливания на 220 *В* для ограничения тока первичной обмотки трансформатора, диоды, резисторы, пара высоковольтных конденсаторов для фильтра и чувствительный микроамперметр. Мощность лампы должна быть пропорциональна мощности прибора. Ограничение тока через измерительную головку и испытываемую деталь осуществляется высокоомным высоковольтным резистором (ияи цепочкой резисторов) с сопротивлением 5÷50 *МОм*. Микроамперметр необходимо защитить парой встречно-параллельно включенных диодов с допустимым током не менее 1 *А*. Схема прибора приведена на рис. 6.

### ИЗМЕРИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОБОЯ




C1, C2: 0,01 - 0,5 мкФ
D1, C2: Uобр. ≈ 2,5 Uатор.
D3. Uобр.≥ 60 В, Iпр. = 1А, мост
D4, D5. Uобр.≥50 В, Iпр. ≈ 3А.
R1: подбирается, обычно 10 - 500 МОм. P ≥ 5Вт высоковольтный.
R3. 5 - 50 МОм, должен выдерживать максимальное выходное напряжение.
R4: 500 - 200 кОм, P ≈ 2Вт.
T1: ЛАТР, Uвх = 220 В, Uвых = 0 - 200 В.
T2: Uвх = 220 В, Uвых = 5 - 10 кВ.

### Измеритель — ограничитель тока пробоя

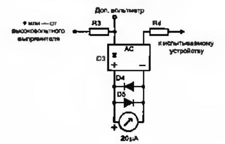



*Рис 6*

# ВХОДНЫЕ ЦЕПИ УСИЛИТЕЛЕЙ

Большинство настроенных входных и выходных схем в КВ усилителях — это П—контуры. Существует несколько путей определения *Q* (добротности) П—контуров. Например, *Q* определяется как входной импеданс П—контура, деленный на значение входного реактанса, где шунтирующий элемент — обычно емкость.

## ОПТИМИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Тетроды и пентоды должны иметь пиковое ВЧ напряжение возбуждения, приблизительно равное напряжению смещения. Задача выбора величины шунтирующего сопротивления для создания необходимого напряжения возбуждения при различных напряжениях смещения состоит в согласовании напряжения возбуждения и напряжения смещения. Большинство современных трансиверов имеют выходную мощность 100+200 *Вт*, что соответствует пиковому напряжению 100+141 *В* на нагрузке 50 *Ом*.

• Для ламп, у которых напряжение смещения 50+70 вольт, таких как 3CX800A (ГУ-74Б), применяется понижающий ВЧ трансформатор 4:1 (2:1 по *U*) и используется нагрузочный резистор величиной 12,5 *Ом*.

• Для ламп, у которых напряжение смещения 100+140 *В*, используется прямая раскачка, и шунтирующий резистор должен быть 50 Ом.

• Для ламп с напряжением смещения 200+280 *В* применяется повышающий ВЧ трансформатор 1:4 (1:2 по *U*) и шунтирующий резистор соответственно 200 *Ом*.

• Для ламп, у которых напряжение смещения более 300 *В*, применяется повышающий ВЧ трансформатор 1:9 (1:3 по *U*) и шунтирующий резистор соответственно 450 *Ом*.

В случае, если пиковое напряжение на сетке при максимальном возбужденни великовато, можно установить катодный резистор отрицательной обратной связи, который поможет выровнять разницу в напряжениях. В качестве примера приведена схема на **рис. 7**.

## ЗАЗЕМЛЕННАЯ СЕТКА ИЛИ КАТОД?

Последние лет 30 в большей части разрабатываемых любительских усилителей использовались лампы преимущественно в режиме класса АВ2 с возбуждением в цепь катода, т.е. «с заземленной сеткой». Одной из причин этого является кажущаяся простота. Заземли сетки — и раскачивай в катод. Нужны только три переключателя — прием/передача, накал, анод. Теоретически нейтрализация усилителя не нужна, т. к. заземленные сетки экранируют выходной электрод (анод) от входного (катод). И теория работает почти правильно. Усилители с заземленной сеткой почти всегда стабильны на рабочей частоте, поскольку емкостное сопротивленне цепи обратной связи слишком велико для самовозбуждения на частотах КВ диапазона. Другим преимуществом является возможность использования практически любой лампы с высоким μ, у которой защитная сетка не соединена с катодом внутри баллона лампы. Схема позволяет получить большую линейность, а усиление мощности от 10 до 14 *дБ* (от 10 до 25 раз).

Может показаться, что самый простой усилитель, который может быть изготовлен, — это усиятель с заземленной сеткой. В усиятелях по схеме с раскачкой в сетку и заземленным като-

дом входное и выходное напряжения находятся в противофазе, и они противоположны друг другу. Для возникновения условий самовозбуждения выходное и входное напряжения должны находится в фазе по отношению друг к другу посредством схемы сдвига фазы. В усияителях с заземленной сеткой выходное и входное напряжения всегда находятся в фазе по отношению друг к другу, тем самым увеличивая вероятность возникновения самовозбуждения.

Много лет существоваяо мнение, что усилители с заземленной сеткой изначально стабильны, потому что заземленная сетка выполняет функцию экрана между выходными и входными цепями и тем самым блокирует самовозбуждение. На КВ это выглядит вполне логично, но на УКВ данная логика неверна, потому что как бы тщательно ни была разработана лампа, на определенной частоте «заземленная сетка» будет иметь собственный резонанс. Это неизбежно по причине наличия конструктивных индуктивностей: структуры сетки, внутренних и внешних выводов, ламповой панельки, образующих с емкостью структуры сетки резонансный контур. Например, в триоде 3—500Z заземленная сетка имеет собственный резонанс в районе 95 *МГц*. При частоте выше собственного резонанса сетки цепь приобретает индуктивный реактанс и уже не является заземленной. Когда сетка плохо заземлена, в случае усияения частоты выще ее собственного резонанса, экран, на который мы рассчитываем как на блокирующий самовозбуждение, не выполняет своих функций.

Процессы, происходящие в усилителе с заземленной сеткой, не так просты, как это кажется на первый взгляд. Переменная составляющая анодного и сеточного токов, т. е. ВЧ тока катода, течет через катодный конденсатор связи и входную настраиваемую цепь таким образом, что входная и выходная цепи включены последовательно, но противофазно. Элементы перестраиваемых цепей должны выдерживать значительные ВЧ токи и напряжения. Производители ламп, предназначенных для работы в схеме с заземленной сеткой, обычно рекомендуют настраиваемую вход-

ную цепь с добротностью $Q = 2{\div}5$. Для поддержания приемлемого КСВ и $Q$ при изменении рабочей частоты необходима пропорциональная подстройка реактивных элементов входной цепи. Тем не менее, если $Q$ изменяется, $L$ можно и не изменять, а попытаться подстраивать только $C_{настр}$ и $C_{связи}$.

Несмотря на то, что усилители КВ диапазона с заземленной сеткой стабильны на рабочей частоте, на УКВ сетка утрачивает свою способность экранировать выход от входа. Такие усилители имеют плохую репутацию по части устойчивости к самовозбуждению на УКВ, поэтому необходимо принимать специальные меры для устранения условнй, способстаующих самовозбуждению.

Для работы в широком диапазоне усилителям класса АВ1 с общим катодом требуются более простая входная настраиваемая цепь, чем для усилителя с общей сеткой. Обычно усилители класса АВ1 с общим катодом имеют больший коэффиент усиления по мощности, чем усилители с общей сеткой. Усияитель класса АВ1 с общим катодом имеет такое же усиление, как два последовательно включенных усилителя класса АВ2 с общей сеткой. Недостатком усилителя с общим катодом является необходимость применения двух дополнительных регулируемых источников питания — экранного напряжения и сеточного смещения.

## НАСТРОЕННЫЕ ВХОДНЫЕ ЦЕПИ

Усилители класса АВ1 с заземленным катодом выглядят сложнее, чем класса АВ2 с заземленной сеткой. Тем не менее, настроить входную цепь для многодиапазонного усилителя класса АВ1 сравнительно просто.

Входная емкость ламп, обычно используемых в таких усилителях, лежит в пределах $10{\div}130$ *пФ*. В связи с тем, что емкость сетки включена параллельно входу, по мере возрастания частоты КСВ ухудшается. Эта проблема может быть решена подключением переменной индуктивности параллельно сетке. Индуктивность подбирается такой, чтобы индуктивный реактанс +jXl компенсировал емкостный реактанс —jXc сетки на рабочей час-

тоте и, когда КСВ входной цепи минимальный, сеточная цепь будет настроена в резонанс (рис.7).

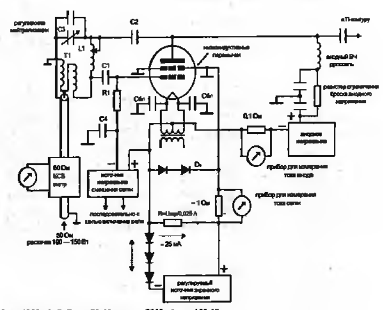
Если «холодный» конец перестраиваемой катушки соединить с соответствено подобранным емкостным делителем напряжения, установленным между анодом и корпусом, усиятель будет нейтрализован на частоте настройки сеточной цепи. Эта схема удобна для перекрытия всей полосы частот 1,8÷30 *МГц*. Соотношение емкостей в делителе напряжения эквивалентно отношению емкости обратной связи (т. е. проходной емкости анод — сетка), деленной на входную емкость сетки. Обычно это соотношение составляет 150:1. В классе АВ2 с заземленной сеткой нелегко достигнуть широкополосного согласования, и поэтому полоса пропускания настроенной входной П-образной цепи при рекомендуемой добротности $Q = 2$ недостаточна для перекрытия необходимой полосы частот. Следовательно, требуется применение нескольких таких контуров с переключаталем.

## НАСТРОЕННЫЕ ВХОДНЫЕ ЦЕПИ УСИЛИТЕЛЯ КЛАССА АВ2 С ЗАЗЕМЛЕННОЙ СЕТКОЙ

Ток, текущий во входной настроенной цепи усилителя с заземленной сеткой, находится в противофазе с импульсами анодного тока. Синусоидальный импульс ВЧ тока катода состоит из суммы анодного и сеточных токов. Если драйвер подсоединен к другому концу настроенной цепи, некоторая часть ВЧ катодного тока попадает назад в драйвер. В результате драйвер взаимодействует с усилителем. Добротность настроенного входа усилителя влияет на это взаимодействие.

В современных КВ трансиверах используются широкополосные двухтактные транзисторные выходные каскады. Наличие в них диапазонных фильтров Чебышева или Баттерворта подавляет иежелательные излучения. За счет комплексного выходного сопротивления выходного каскада эти фильтры имеют индуктивный или емкостиой реактанс внутри своих полос пропускания. Другими словами, выходное сопротивление современных трансиверов редко бывает 50±j0 *Ом*. Когда возбуждение подается через

Усилитель класса AB1 с общим катодом. Упрощенная схема.




C1: ~ 1000 пФ, 5 кВ для 80-10 метров, 2000 пФ для 160-10 метров
C2: ~ 8пФ
C3: емкость нейтрализации, суммарно ~ 1100 пФ, переменная ~ 250 пФ
C4: ~ 0,02 мкФ
R1: ~ 200 Ом при бифилярной намотке T1 и ~ 450 Ом при трифилярной
L1: индуктивность, достаточная для резонанса на нижней рабочей частоте совместно с емкостью сетки
T1: широкополосный трансформатор

— Для минимизации индуктивности/фазового сдвига в нейтрализационных цепях используется емкостной делитель напряжения C2-C3
— Индуктивность всех выводов в цепи нейтрализации должна быть минимальной. L1 и C3 должны быть расположены возле проходного изолятора под шасси, и это является важным условием для нейтрализации схемы усилителя класса AB1

Ds. диоды, предохраняющие пробой напряжением. Предохраняют компоненты, которые соединены с катодной цепью — такие, как накальный трансформатор, источник сеточного напряжения и источник экранного напряжения. Эти диоды закорачиваются в момент пробоя анодного напряжения на корпус или пробоя анод-сетка и должны быть рассчитаны на максимальное напряжение сетки плюс 500В и ток около 8А. В связи с тем, что эти диоды закорачиваются в момент пробоя, они должны быть расположены в таком месте, чтобы их было легко заменить.
Ск: катодные блокировочные емкости. Они должны выдерживать пиковый ток катода. Желательно применять два конденсатора различной емкости, чтобы их общая емкость была около 5000 пФ. Назначение этих емкостей — уменьшение индуктивности между накальными выводами и землей.

*Рис. 7*

настроенный вход в усилителях с заземленной сеткой, реактанс фильтра взаимодействует с входным реактансом настроенного входа усилителя. Длина коаксиального кабеля между драйвером и настроенным входом влияет на это взаимодействие. Когда производители ламп указывают входное сопротивление в усилителях с заземленной сеткой $R_{вх}$, они указывают среднее значение. Мгновенный входной импеданс сильно изменяется при подаче входного синусоидального сигнала. В течение большей части положительного полупериода входного сигнала сетка имеет отрицательный потенциал относительно катода и, следовательно, в цепи сетки ток не течет и входное сопротивление очень велико. При отрицательном входном полупериоде напряжение на сетке относительно катода растет, увеличивая ток анода, и, когдв оно становится положительным, появляется сеточный ток и входное сопротивленне резко палает.

Рассмотрим, к примеру, усилитель на двух триодах 3-500Z фирмы Eimac®. Когда входное напряжение достигает отрицательного пикового значения 117 *В*, анодный ток максимален, а мгновенное анодное напряжение минимально — около 250 *В*. При этом пик анодного тока достигает 3,4 *А*. В этом случае входное сопротивление катода равно: 117 *В* / 3,4 *А* = 34,5 *Ом*, а пиковая подводимая мощность равна: 117 *В* x 3,4 *А* = 397 *Вт*. Другими словами, значенне входного импеданса колеблется от бесконечности до 34,5 *Ом*. Значение же входной мощности изменяется от 0 *Вт* в положительном пике до 397 *Вт* на пике отрицательной входной полуволны. Вот почему работа входных П-контуров сводится к функции согласующего трансформатора и накопителя энергии. Поэтому простой широкополосный трансформатор не может адекватно выполнять функцию согласования выходного импеданса драйвера и катодной цепи усилителя с заземленной сеткой. Добротность настроенной схемы работает как накопитель энергии. Большая добротность накапливает больше энергии, выравнивая входной импеданс, создавая тем самым низкий входной КСВ, но полоса пропускания при этом сужается. При большой добротности КСВ на входе усилителя может быть близким к идеальному в центре диапазона, но неприемлемым на его концах. Фирма Eimac® обычно рекомендует

использовать входной П—контур с добротностью $Q = 2$ для класса АВ2 с заземленной сеткой. При такой добротности реактанс входной емкости С1 равен −j50 Ом и, разделив это значение на 2, получим −j25 *Ом*. Используем формулу С = 1/j25x2f, и получаем примерно 220 *пФ* входной емкости, необходимой при добротности 2 для диапазона 10 метров. В обычной практике, тем не менее, 220 *пФ* могут быть дляеки от значения, создающего удовлетворительный КСВ с обычными моделями трансиверов и обычной длиной коаксиального кабеля. Можно попробовать подобрать длину кабеля, что может улучшить эту проблему на 10 *м*, но есть еще 8 других диапазонов ниже 30 *МГц*. В связи с тем, что переключать входные кабели различной длины проблематично, было бы полезным, если бы во входных цепях усилителей с заземленными сетками конденсаторы ияи катушки были перестраиваемыми.

# ВЧ ЭЛЕМЕНТЫ ВЫХОДНОГО КАСКАДА

## СХЕМЫ П-КОНТУРОВ

Когда добротность выходного П—контура низкая, могут возникнуть две проблемы: подавление гармоник может быть неудовлетворительным, а пределы изменения согласуемых сопротивлений нагрузки могут уменьшиться. Другими словами, когда добротность низкая, контур не сможет согласовать нагрузку даже с сопротивлением 50 *Ом*. Когда добротность контура очень высокая, КПД контура снижается из-за возрастания тепловых потерь, пропорциональных $I^2R$. Оптимвльная величина добротности $Q$ должна быть минимум 12 и максимум 15. Более высокая добротность может привести к росту тепловых потерь. Лучшие параметры контура можно получить, применяя П—L схемы. По сравнению с П-, П—L контур имеет на 15 *дБ* лучшее подавление гармоник и более широкую полосу согласования. Недостатком этой схемы является большая сложность — наличие катушки с отводами и большее количество секций в переключателе.

## ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ И НАГРУЗКА ПО ТОКУ

По мере возрастания частоты сигнала пропорционаьно уменьшается величина тока, текущего внутри проводника, и ВЧ ток все больше концентрируется на поверхности. С ростом частоты и уменьшением площади поверхности проводника, проводящей ВЧ-ток, сопротивление катушки увеличивается. Например, медный провод диаметром около 2 *мм* выдерживает переменный ток 50 *Гц* в 20 *А* с небольшим нагревом. На 30 *МГц*

максимальный ВЧ ток, протекающий через провод диаметром 2 *мм*, равен 5 *А*, поэтому площадь контактов переключателя диапазонов может быть соответственно уменьшена по мере увеличения чвстоты. Параллельное включение контактов — один из вариантов увеличения допустимой токовой нагрузки на контакты переключателя диапазонов.

Катушка индуктивности П-контура будет вносить некоторые потери, если не изменять проводящую поверхность катушки пропорционаяьно частоте. Неоптимальный диаметр провода, которым намотана контурная катушка — одна из основных причин уменьшения КПД усилителя на высоких частотах. Катушка П-контура, намотанная проводом диаметром 1,6 *мм*, при мощности 1,5 *кВт* обычно более чем достаточна по КПД для диапазона 1,8 *МГц*. Для эффективной же работы на частоте 29 *МГц* рекомендуется применять катушку, выполненную из медной трубки диаметром около 10 *мм* ияи шиной с соответствующей площадью поверхности. Конечно, из-за изменения затухания сигнаяа с ростом частоты на приемной стороне даже уменьшение мощности передатчика на 30% практически не заметно. Следовательно, «выжимание» нескольких процентов КПД на 10 *м* не имеет большого значения.

Расчет ВЧ тока в катушке индуктивности довольно сложен. Приближенно его можно определить как произведение максимума анодного ВЧ тока на добротность *Q*. Например, если анодный ток 1,2 *А*, а добротность нагруженного контура *Q* = 15, то ток в катушке будет: 1,2 x 15 = 18 *А*.

## СЕРЕБРО И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

С точки зрения уменьшения потерь в контуре серебро, по сравнению с медью, внешне более привлекательно и менее подвержено окислению. Тем не менее, серебро не дает особого преимущества на частотах ниже 100 *МГц*, а окисление меди может быть предотвращено полировкой поверхности с последующим покрытием полиуретановым лаком.

Серебро широко используется для пайки. Припой, состоящий из 95% олова и 5% серебра имеет температуру плавления около 220° С. По сравнению с обычно используемыми в электронике оловянно-свинцовыми припоями, он имеет в 3,5 раза большую прочность и лучшую растекаемость, особенно с плохо паяющимися материалами. Такой припой идеален для пайки деталей П-контура, переключателей диапазонов, отвалившихся выводов ламп, цепей подавления паразитных колебаний с низкой добротностью и т.п. При повторной пайке в местах, где был оловянно-свинцовый припой, необходимо сначала как можно тщетельнее удалить остатки старого припоя.

## АНОДНЫЙ ВЧ ДРОССЕЛЬ

Основные рекомендации относительно анодного ВЧ дросселя следующие:

- дроссель должен иметь достаточный реактанс на самой низкой рабочей частоте для ограничения ВЧ тока, текущего через дроссель, на приемлемом уровне;
- дроссель не должен иметь собственного резонанса в диапазоне рабочих частот;
- провод, используемый для намотки, должен выдерживать протекание постоянного анодного тока плюс ВЧ ток на самой низкой частоте без значительного нагрева.

Если ВЧ анодный дроссель имеет собственный резонанс на рабочей частоте иян вблизи ее, на нем может появиться потенциал, во много раз превышающий напряжение источника анодного питания. В этом случае дроссель может пробиться и сгореть. Сгорание внодного дросселя может разрушить не только сам дроссель. Из-за образования ионизированного газового облака могут образоваться дополнительные проводящие пути и выйти из строя находящиеся рядом ВЧ элементы и, если не использовать ограничительные резисторы в блоке питания, то повреждения могут быть более значительными.

В связи с вышеизложенным при изготовлении анодного дросселя необходимо использовать провод с высоковольтной термо-

стойкой изоляцией и малыми потерями на ВЧ. Для каркаса можно использовать изоляционные материалы с подобными свойствами: высокочастотную керамику, фторопласт, стеклопластик. Ток дросселя желательно ограничить величиной не более 1 *А*. Для ориентировочного определения величины тока необходимо $^2/_3U_a$ разделить на реактанс дросселя на нижней рабочей частоте, т. е. воспользоваться законом Ома.

На самой низкой рабочей частоте анодный дроссель должен иметь достаточную индуктивность для ограничения протекающего тока. Для уменьшения тока, протекающего через дроссель, необходимо увеличение индуктивности, тем не менее, большая индуктивность означает больше паразитных резонансов и большую вероятность возгорания дросселя. Какой же выход?

Многие годы использовались различные схемы борьбы с резонансами дросселя. Попытки намотки секциями не давали желаемых результатов, и это не удивительно, потому что максимальная развязка между секциями достигается, когда они расположены под прямым углом друг к другу. В этом случае может помочь использование двух небольших дросселей, расположенных под прямым углом. Дроссель с большей индуктивностью (около 60 *мкГн*) свободен от собственных резонансов вблизи чвстот любительских диапазонов и имеет реактанс $X_1 = 679$ *Ом*.

Напряжение, прияюженное к ВЧ дросселю, составляет, как правило, $^2/_3$ от напряжения питания анода. Например, если усилитель питается напряжением 3000 *В*, это означает 2000 *В* эффективного напряжения на дросселе. Если индуктивность дросселя 60 *мкГн*, то на частоте 1,8 *МГц* ВЧ ток, текущий через анодный дроссель, будет: 2000 *В* / 679 *Ом* = 2,95 *А*. Разделительный конденсатор в этом случве подобрать сложно, т. к. обычный дисковый конденсатор рассчитан на ток до 1 *А*. Другая проблема в том, что на 1,8 *МГц* необходима емкость 130 *нФ* ($X_c$=679 *Ом*) дяя компенсации реактанса дросселя $X_L$=679 Ом. Следовательно, пропускание тока 3 *А* на 1,8 *МГц* потребует выбора соответствующего конденсатора. Собственные резонансы внодного дросселя можно проверить после его установки при помощи ГИРа, и если собственный резонанс находится в пределах ±5% от рабочей частоты — могут возникнуть проблемы.

Изменив число витков, можно изменить частоту резонанса дросселя, тем самым немного увеличив величину проходящего тока, но наиболее эффективным способом является переключение ВЧ дросселей для работы на различных диапазонах с помощью вакуумных реле

## КОНДЕНСАТОРЫ И ВЧ ТОК

Конденсаторы, через которые течет ВЧ ток, имеют разную природу внутреннего нагрева. Как и конденсаторы сглаживающих фильтров, эквивалентное последовательное сопротивление в емкостных цепях излучает тепло, которое пропорционально $I^2R$. Из-за поверхностного эффекта сопротивление возрастает с ростом частоты. Другим источником тепла являются диэлектрические потери. В связи с тем, что диэлектрические потери тоже увеличиваются с изменением частоты, ток, текущий через конденсаторы, тоже меняется с частотой. Обычно конденсаторы, используемые в передатчиках, проверены по току на трех различных, далеко отстоящих одна от другой частотах. Необходимо проверять значения тока, указанные производителем, прежде чем использовать емкости в передающих каскадах. Однако то, что эти емкости предназначены для передатчиков, не значит, что они будут хорошо работать в других ВЧ каскадах.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ БЛОКИРОВОЧНОЙ ЕМКОСТИ

Компоненты блока питания могут быть повреждены ВЧ напряжением, особенно электролитические конденсаторы. Необходимо установить ВЧ блокировку со стороны подачи высокого напряжения на анодный дроссель. При этом на источнике питания не должно возникать ВЧ напряжение более чем 10 вольт на самой низкой рабочей частоте.

Величину блокировочной емкости обычно определяют по закону Ома. ВЧ ток, протекающий через анодный дроссель, и величина блокировочной емкости должны быть рассчитаны на самой низкой частоте — обычно на 1,8 *МГц*. Например, если

реактанс анодного дросселя $X_L = j2000$ *Ом* и анодное напряжение 2000 *В*, ток, протекающий через анодный дроссель, будет равен: 2000 *В* / 2000 *Ом* = 1 *А*. Исходя из рекомендованного ранее максимального значения ВЧ напряжения 10 *В*, сопротивление блокировочного конденсатора должно быть ≤10 *Ом*. Вычислим величину емкости: $C = 1/2\pi f = 1/2x3.14x1,8$ *МГц* = 8842 *пФ*. Применяемой обычно емкости 1000 *пФ* недостаточно, так как при этом величина ВЧ напряжения будет 88 *В* при величине анодного тока, протекающего через анодный дроссель, 1 *А*.

Высоковольтные дисковые конденсаторы не рассчитаны на ВЧ напряжение и не могут быть использованы в качестве блокировочных, их обычно применяют только в блоках питания. Даже емкость 2500 *пФ* / 7,5 *кВ* при анодном токе 1 *А* на частоте 1,8 *МГц* заметно нагревается.

## ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Правильный выбор высоковольтных разделительных конденсаторв является очень важным для нормальной работы усилителя. Они предназначены для разделения высоковольтных цепей постоянного и ВЧ переменного токов. При работе на 10 *м* через разделительный конденсатор должна протекать большая часть тока колебательного контура. И вот почему. Анодная емкость лампы на 10 *м* диапазоне составляет существенную часть емкости настройки. Поэтому большая часть тока, циркулирующего в контуре, протекает через разделительный конденсатор. В усилителях мощности на 10 *м* диапазоне ток в контуре величиной 5÷10 *А* ие является редкостью, и выбор разделительного конденсатора должен быть обоснованным. Желательно выбирать конденсатор (или конденсаторы), рассчитанные на пропускание максимального тока контура.

Емкость разделительного конденсатора не очень критична, и 1000 *пФ* более чем достаточно для работы на 1,8 *МГц*. Емкостный реактанс $X_c = 88$ *Ом* весьма незначителен по сравнению с выходным анодным сопротивлением 1÷2 *кОм*.

## РАБОЧАЯ ОБЛАСТЬ

«Рабочая область» — термин, характеризующий область, в которой происходит мгновенное изменение анодного напряжения вверх и вниз без ограничения, и сигнаы усиливаются без искажений. В тетродах максимальный пик анодного тока (при минимальном напряжении) может привести к чрезмерному току экранной сетки и ухудшить линейность. Мгновеиное уменьшенне анодного напряжения не должно становиться намного ниже напряжения экранной сетки. Например, для тетрода с напряжением анода 4000 *В* и напряжением на экранной сетке 700 *В* рабочая область составляет примерно 4000 – 600 = 3400 *В* (пиковое).

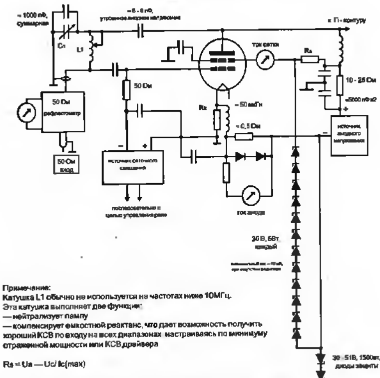
В пентодах мгновенное изменение анодного напряжения может быть достаточно близко к напряжению отсечки, которое обычно составляет около 0 *В*. Так, например, если напряженне экранной сетки 800 *В*, то рабочая область будет около 3750 *В*, поэтому пентоды имеют бо́льшую рабочую область, чем тетроды и, как следствие, пентоды немного эффективнее тетродов. Однако пентоды дороже, а выбор их ограничен.

Пентоды обычно имеют меньшую проходную емкость, чем тетроды, и это делает пентоды теоретически более стабильными. Многие разработчики усилителей с использованием пентодов не применяют нейтрализацию, потому что пентоды имеют относительно небольшую емкость обратной связи между анодом и управляющей сеткой. Тем не менее, для высокой линейности и стабильности, а также низкого входного КСВ пентод должен иметь нейтрализацию. Это хорошо видно на рис. 8 для тетрода класса АВ1. Используя эту схему с пентодом, необходимо соединить защитную сетку с катодом через ограничительный резистор величиной около 10 *Ом*. Однако защитная сетка должна всегда быть соединена с землей по ВЧ для уменьшения обратной связи между анодом и управляющей сеткой.

## ЗАЩИТА ЭКРАННОЙ СЕТКИ

Экранная сетка каждой лампы имеет максимвльно допустимую мощность рассеивання и, если произаедение тока сетки на напряжение достигнет этой величины, лампа может быть выве-

Схема усилителя класса АВ1 с заземленным катодом для ламп с напряжением на сетке до 1000 В




Примечание:
Катушка L1 обычно не используется на частотах ниже 10МГц.
Эта катушка выполняет две функции:
— нейтрализует лампу
— компенсирует емкостной реактанс, что дает возможность получить хороший КСВ по входу на всех диапазонах настраиваясь по минимуму отраженной мощности и КСВ драйвера

Rs = Ua — Uc/ Ic(max)

Rk: катодный ВЧ резистор отрицательной обратной связи, обычно 5-20 Ом.
Rk снижает интермодуляционные искажения и защищает лампу от перекачки. Не шунтируйте катод по ВЧ. Используйте один катодный ВЧ дроссель или один Rk для каждой лампы.
— Нейтрализация: Когда L1 настроена по минимуму отраженной мощности настройте Сп на минимальный уровень ВЧ излучения анода (используйте нагрузочный резистор на выходе П-контура). Обычно нейтрализацию настраивают один раз, и диапазон 15м вполне подходит для этого.
— Снизить возможность перегрева катода (пробой накал-катод) можно, соединив один конец накала с катодом. Запитайте накал через бифилярно намотанный дроссель, имеющий индуктивность 40мкГн. Не заземляйте другой конец накала

*Рис 8*

дена из строя. Это может легко произойти в отсутствие нагрузки иям при малой нагрузке, поэтому применяются различные схемы защиты. В случае исчезновения анодного напряжения при поданном напряжении на экранную сетку и при отсутствии защиты сеточный ток будет чрезмерным. Другая опасность — это обратный ток сетки. Обратный ток сетки может легко стать неконтролируемо растущим. Это происходит почти мгновенно. Обратный ток сетки обычно наблюдается при работе в классе AB1. Пока сгорит предохранитель в резистивной нагрузке или шунт в стабилизаторе регулировки смещения, обратный ток сетки может быстро вывести лампу из строя. Для ламп с напряжением сетки 300—850 *В* регулирующий шунт в цепи стабилизатора является приемлемым решением. Шунт стабияизатора соединен через высокоомный резистор с источником анодного напряжения.

Преимущества шунтового регулирования напряжения экранной сетки:

- ограничение максимального тока экранной сетки;
- защита от протекания обратного тока экранной сетки;
- отключение экраиного напряжения при пропадании анодного.

Для мощных ламп с большими токами экранной сетки такие регуляторы не практичны, лучше применить регулятор последовательного типа. Для защиты от обратного тока сетки на выходе регулятора необходимо установить шунтирующий резистор. Он должен выдерживать ток, равный 20+25% тока экранной сетки. Для защиты от чрезмерного тока экранной сетки можно применить быстродействующий предохранитель или автоматический магнитный выключатель по первичной обмотке трансформатора питания сеточных цепей.

# СТАБИЛЬНОСТЬ В УКВ ДИАПАЗОНЕ

## ПАРАЗИТНЫЕ ЦЕПИ В УСИЛИТЕЛЯХ

Каждый ВЧ усилитель имеет, по крайней мере, две резонансных цепи на выходе схемы. Более очевидной является схема ВЧ контура (П-контур). Менее очевидной является резонансная УКВ цепь, образованная анодной емкостью и индуктивностью проводов между анодом и выходным контуром. В усилителях мощностью 1500 *Вт* анодная цепь резонирует на частотах около 100 *МГц*, что лежит далеко за пределами рабочего диапазона частот, оговоренного в технических характеристиках на используемые лампы (рис. 9).

Эквивалентное сопротивление высокодобротной параллельной резонансной цепи очень большое, а низкодобротной — малое. Усиление лампы пропорционально сопротивлению нагрузки: большему сопротивлению соответствует большее усиление. Если проводники в анодной цепи имеют в диапазоне УКВ высокую добротность, эквивалентное сопротивление анодной нагрузки будет высоким и усиление лампы на частоте УКВ резонансной цепи также будет высоким. При низкой добротности проводников результат будет противоположным. Любой импульс тока в анодной цепи вызовет в этом контуре затухающие колебания. Их можно даже увидеть с помощью осциллографа или анализатора спектра. Амплитуда этих колебаний пропорциональна добротности анодного контура, и если даже частично не просачивается на вход, то тогда нет никаких проблем.

Принято считать, что в усилителе с заземленной сеткой сетка экранирует вход от выхода. В усилителе класса AB1 с раскачкой

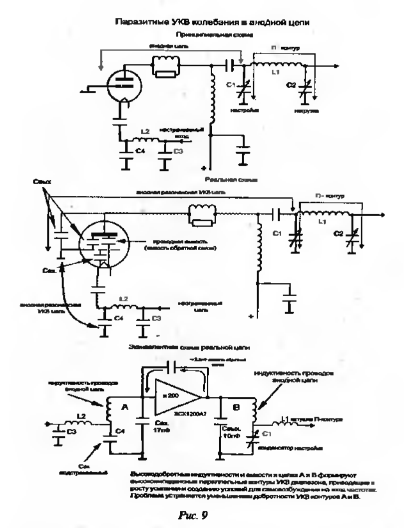



*Рис. 9*

по управляющей сетке кажется, что заземленная по ВЧ вторая сетка также экранирует вход от выхода. Тем не менее, реально это не происходит, и часть слабого УКВ сигнала из анодной

цепи просачивается на вход через паразитные емкости и усиливается. В случае, если амплитуда и фаза этого сигнала окажутся соответствующими, возникнут колебания на частоте резонанса анодной УКВ цепи. Если эти колебания найдут себе какую-либо нагрузку, ни к чему страшному это не приведет, однако выходной П-контур усилителя является ФНЧ и эффективно подавляет сигналы, лежащие выше диапазона рабочих частот, поэтому получившийся УКВ генератор работает без нагрузки. Это вызывает резкое возрастание сеточного тока и УКВ напряжения в анодной цепи, вследствие чего может произойти пробой по ВЧ в КПЕ и переключателе диапазонов. Чаще всего это происходит на контактах КПЕ и разомкнутых контактах переключателя 10 *м* диапазона, т. к. они расположены ближе всего к анодной цепи и наиболее уязвимы к такому пробою. В таком случае контакты переключателя диапазонов могут даже расплавиться или испариться.

## ПОДАВЛЕНИЕ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ

В радиолюбительской литературе неоднократно описывались методы подавления паразитного УКВ самовозбуждения. Логика здесь простая. Подавитель должен работать в анодной цепи, а т. к. низкая добротность ассоциируется с большими потерями, то почему бы не уменьшить *Q*, используя провод с высоким сопротивлением? «Комбинация сопротивления и индуктивности очень эффективна для ограничения паразитных колебаний до пренебрежимо малой величины». Это цитата из «The Radio Amateur's Handbook» 1929 года. Однако в последующие издания эту фразу почему-то забывали включать. Тогда эта оплошность не сильно волновала радиолюбителей, потому что мощные генераторные лампы имели низкое усиление на УКВ и такая нестабильность не имела большого значения. В последующие десятилетия у радиолюбителей вошло в привычку использовать подавители из медного или даже посеребренного провода. Это произошло потому, что для монтажа анодных цепей применялся такой провод (как бы для уменьшения потерь на рабочей частоте), и паялся

он намного проще, чем нихром. Тем временем параметры ламп улучшались (крутизна ВАХ, диапазон рабочих частот и т. д.), и теперь старые методы подавления с помощью уменьшения добротности на УКВ приобрели актуальность.

## ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ БОРЬБЫ С ПАРАЗИТНЫМИ ИЗЛУЧЕНИЯМИ

Для увеличения потерь и снижения добротности паразитных цепей на УКВ необходимо использовать провода с большим удельным сопротивлением. Наилучшими являются сплавы никеля, хрома и железа. Возможно также использование и некоторых сортов нержавеющей стали. Использование меди, алюминия и серебра должно быть сведено до минимума. Тем не менее, после конденсатора настройки желательно применять хорошие проводники, поскольку этот конденсатор разделяет УКВ резонансную цепь и собственно П-контур.

Выходное сопротивление большинства ламп составляет единицы килоом, поэтому нет необходимости использовать толстые проводники между анодом и конденсатором настройки. Если основным критерием разработки является УКВ стабильность (отсутствие паразитного самовозбуждения), то нет необходимости использовать проводники бóльшие, чем необходимо для пропускания максимально возможного тока (т. е. тока ВЧ на 10-метровом диапазоне между выходной анодной емкостью лампы и конденсатором настройки). Проводники круглого сечения имеют меньшую добротность на УКВ, чем плоские шины. Для увеличения токовой нагрузки или уменьшения индуктивности проводов применение двух параллельных круглых проводов, разнесенных на достаточное расстояние, предпочтительнее применения плоской шины такой же общей ширины.

## ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ УСИЛИТЕЛЕЙ

1. При проектировании расположения деталей (топологии) усилителя располагайте конденсатор настройки (анодный конден-

сатор П-контура) как можно ближе к аноду. Это уменьшит индуктивность резонансной цепи анода и увеличит УКВ резонансную частоту. Если это расстояние достаточно велико, может образоваться линия $^3/_4\lambda$, и это создаст проблемы со стабильностью, особенно при применении современных широкополосных ламп.

2. Для разделения УКВ резонансной цепи и выходного П-контура подсоединяйте катушку индуктивности непосредственно к конденсатору настройки. Это лучше, чем подключать ее к разделительному конденсатору.
3. Экранированный объем, в котором расположены выходные цепи усилителя, может создать высокодобротный УКВ объемный резонатор и способствовать возникновению паразитных колебаний. Эта проблема особенно актуальна для мощных промышленных усилителей. Для подавления таких колебаний используются короткозамкнутые витки из проводов с высоким сопротивлением.
4. В некоторых случаях анодный дроссель может иметь резонанс на УКВ, который будет способствовать возникновению паразитных колебаний. Это можно определить по наличию нескольких сгоревших витков на дросселе после пробоя. Для устранения такого резонанса можно попробовать использовать одну или несколько ферритовых бусин, рассчитанных на подавление УКВ колебаний, надетых на «горячий» вывод дросселя.

Одним из важных правил является то, что добротность цепи равна эквивалентному реактансу, деленному на сопротивление, или $Q = X/R$. Добротность может быть уменьшена увеличением сопротивления, уменьшением реактанса или совместным изменением этих величин. Одним из обычных путей снижения добротности $Q$ является применение резисторов или низкодобротных проводников.

Посеребренная перемычка имеет очень большую добротность на УКВ, и обычно посеребренные медные перемычки используются в анодных цепях КВ усилителей в качестве «подавителей паразитных излучений» на УКВ. Более правильным названием

для посеребренных подавителей паразитных излучений было бы «стимулятор паразитного самовозбуждения».

Удельная проводимость меди на 6% меньше удельной проводимости серебра и поэтому медь недостаточно хорошо понижает добротность по сравнению с серебром. Попытка создать низкодобротную цепь из медных проводников или высокодобротного серебра имеет не больше смысла, чем попытка сделать стирательную резинку из фторопласта.

Снижая индуктивный реактанс укорочением длины выводов, можно повысить стабильность, если укорочение проводников в катодной и анодной цепях приведет к большой разнице между собственными резонансными частотами входной и выходной цепей.

Другой метод улучшения стабильности — компенсация некоторого индуктивного реактанса в сеточной цепи соединением сеток с корпусом через небольшие емкости. Это увеличит частоту собственного резонанса сеточной цепи в точке, где лампа усилителя будет иметь меньшую склонность к самовозбуждению. Одним из первых усилителей, в котором была использована данная методика, был усилитель фирмы Collins, выполненный на четырех лампах 811A (аналог — Г-811) по схеме с заземленной сеткой. Многие современные производители усилителей до сих пор используют этот принцип в схемах с подачей возбуждения в цепь катода.

Конденсаторы, которые компенсируют индуктивность сеточных цепей, были наиболее эффективны, когда использовались в усилителях на лампах ранней разработки типа 811A. Эта методика малоэффективна при повышении стабильности современных усилительных ламп, которые имеют низкую конструктивную сеточную индуктивность.

Другой антипаразитной методикой является применение резистора, включенного последовательно во входную цепь и снижающего добротность на частоте собственного резонанса катодной цепи и подавляющего паразитное возбуждение. Входной подавляющий резистор также понижает IMD (интермодуляционные искаженил) при незначительном увеличении мощности раскачки усилителя. Входной подавляющий паразитные излуче-

ния резистор достаточно эффективен для стабилизации неустойчивых усилителей, но он не всегда на 100% успешно решает проблему, и во многих случаях обьектом для улучшения стабильности является анодная цепь.

## ПОДБОР ОПТИМАЛЬНОГО АНОДНОГО АНТИПАРАЗИТНОГО ДРОССЕЛЯ

Предсказать все возможные и невозможные трудности, возникающие при попытке разрешения проблемы паразитного самовозбуждения, невозможно. Например, можно изменить длину контура и получить якобы стабильную работу усилителя, но когда вы закроете крышку и закрутите последний винт, вдруг неожиданно начнет гореть антипаразитный резистор или что-нибудь.

В качестве хорошего примера можно привести историю, описанную американским радиолюбителем AG6K, который устранял проблему паразитного самовозбуждения в промышленно изготовленном усиятеле на двух триодах 3-500Z.

При работе усилителя постоянно слышался звук горящей электрической дуги, но инструкция к данному усилителю гласила, что звук горящей дуги — это нормальное явление! Через несколько месяцев «нормальный» звук горящей дуги привел к выгоранию нескольких контактов переключателя диапазонов выходного каскада. Источником нежелательного ВЧ напряжения, превышающего обычное значение, что привело к подобному результату, могло быть только паразитное возбуждение на УКВ!

Первой попыткой устранить это явление была установка пары входных безиндукционных резисторов номиналом 10 *Ом*, 2 *Вт*, последовательно включенных в ВЧ цепи катодов ламп. К сожалению, контакты продолжали гореть и, что характерно, чем ближе к аноду были расположены выводы колебательного контура, тем сильнее были повреждены контакты.

Прежде чем включить усилитель снова, автор включил два безындукционных резистора номиналом 5 *Ом*/2*Вт* последовательно в цепь анодного напряжения в качестве предохранителя и ограничителя тока на случай, если опять возникнет самовоз-

буждение. Это также должно было ограничить бросок тока при разряде конденсатора фильтра блока питания. Если этого не сделать, то этот бросок тока может превратить сетку в накальную цепь, и сетка замкнется с катодом, что приведет к полному выходу лампы из строя. Если в данном случае применить резистор 10 *Ом*/10 *Вт* — это будет даже лучшей защитой. Далее, перед включением усилителя, был проверен стабилитрон в цепи катода, создающий напряжение смещения, и было обнаружено, что вследствие самовозбуждения произошел большой бросок тока и стабилитрон оказался пробитым. Стабилитрон был заменен на последовательно соединенные кремниевые диоды (7 штук, 1 *А*, 50 *Вт*), включенные в прямом направлении. Это создало напряжение смещения около 5 *В*. При включении усилитель работал стабильно при анодном напряжении 2200 *В* на диапазонах 14 и 28 *МГц*, но при увеличении анодного напряжения до 3200 *В* вновь возникало паразитное самовозбуждение. Ситуация была непонятной!

В каждой схеме КВ усилителя мощности присутствует настроенная цепь УКВ, сформированная емкостью анода относительно земли и общей индуктивностью проводов или перемычек между внодом и емкостью настройки (анодной) П—контура. Резонансная частота этой анодной цепи может быть изменена лишь незначительно подстройкой анодной емкости П—контура.

Была измерена собственная частота резонанса анодной цепи с помощью ГИРа (гетеродинный индикатор резонанса), подсоединенного между анодным дросселем и блокировочной емкостью, которая оказалась равной 130 *МГц* при очень большой добротности. После этого был проверен резонанс центральной жилы кабеля, подающего ВЧ сигнал в катоды — резонанс оказался в районе этой же частоты. Это было плохо!

Основная часть индуктивности, которая формировала резонанс в внодной цепи, создавалась 50 *мм* *U*—образной медной перемычкой, соединяющей разделительный конденсатор и ВЧ анодный дроссель. Безвредная на вид перемычка имела индуктивность 39 *мкГн*, и на частоте 130 *МГц* эта индуктивность имела реактанс +j32 *Ом*. Дал снижения добротности этой цепи параллельно был припаян безындукционный резистор 5,1 *Ом*.

После включения усилителя и подачи раскачки сгорел резистор-предохранитель и резистор, шунтирующий U—образную перемычку. Был сделан вывод, что причиной возбуждения являлась близость частот собственного резонанса анодной и входной цепей (около 130 *МГц*). Если бы можно было увеличить частоту собственного резонанса анодной цепи, где лампы 3—500Z имели бы меньший коэффициеит усиленил, то это дало бы возможность подавить паразитную генерацию.

Причина также могла быть в нелогичном использовании высокодобротной посеребренной перемычки в анодной цепи, так как обычно эта цепь делается низкодобротной для предотвращения возникновения самовозбуждения.

В связи с тем, что был явно очень узкий провал на 130 *МГц*, высокая добротность анодной цепи также являлась фактором, способствующим самовозбуждению.

## НИЗКОДОБРОТНЫЕ ПРОВОДНИКИ

Обычно низкодобротные проводники изготавливаются из нихромовой ленты или провода. Они имеют удельное сопротивление в 60 раз больше, чем медь или серебро. Измерения добротности с помощью УКВ *Q*-метра подтвердили, что нихром имеет намного меньшую добротность, чем другие часто используемые проводящие материалы. К сожалению, нихромовую ленту или провод не всегда легко достать, поэтому мягкая нержавеющая проводока может служить хорошим заменителем, так как имеет удельное сопротивление в 10 раз больше, чем медь, и ее легче достать.

Медный провод был заменен на отрезки нихромовой полоски шириной 3 *мм* и длинной 35 *мм*. Катушка, состоящая из трех витков, выполнениал из нержавеющей проволоки диаметром 1 *мм* и внутренним диаметром 7 *мм*, была соединена параллельно с полоской нихрома для изменения частоты настройки цепи. Это увеличило частоту собственного резонанса анодной цепи до 150 *МГц*, а также снизило ее добротность.

Первоначально установленные посеребренные высокодобротные антипаразитные резисторы были заменены на низкодобротные, составленные из двух 2 *Вт* / 100 *Ом* безындукционных резисторов, включенных параллельно и зашунтированных катушкой с индуктивностью 70 *мкГн*, выполненной из нержавеющей проволоки диаметром 1 *мм*. Для сохранения низкой добротности все выводы цепи антипаразитных дросселей также были выполнены стальной проволокой с петлями на концах для крепления под винт. Можно получить еще более низкую добротность и подавление паразитного излучения, заменив нержавеющую сталь на нихром.

Если при этом усилитель продолжает вести себя нестабильно, надо попробовать увеличить число витков катушки до 4. Не следует слишком увеличивать индуктивность катушки, потому что это может стать причиной большого падения напряжения на 100 *Ом* резисторах в диапазоне 28 *МГц*.

В усилителях с длинными проводниками в анодной цепи рекомендуется применять два и более антипаразитных дросселей, соединенных последовательно, что также снизит добротность на УКВ.

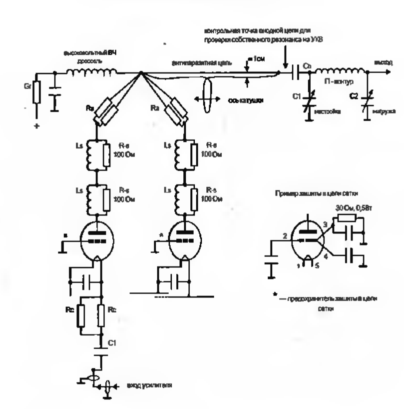
Подобная техника борьбы с самовозбуждением в усилителях мощности успешно была применена во многих промышленных усилителях фирм Kenwood, Heathkit, Henry и других **(рис. 10)**.

## КАК И ПОЧЕМУ УСПЕШНО РАБОТАЕТ АНТИПАРАЗИТНЫЙ ДРОССЕЛЬ

Применение антипаразитных дросселей преследует две основные задачи. Первая задача — это снижение эффекта свободных колебаний в цепях собственного резонанса на УКВ путем понижения добротности резонансной цепи. Эффект свободных колебаний — неотъемлемая часть генерации. Понижая эффект свободных колебаний, мы тем самым снижаем возможность паразитной генерации.

Вторая задача антипаразитного дросселя — снижение усиления напряжения на УКВ. Усиление напряжения примерно про-

Схема подавления паразитных УКВ излучений




Ls: ≈100 нГн, 6 витков 1мм провода NiCr, диаметр катушки 6 мм, расстояние между витками 1мм
Rs. 100 Ом, 3Вт
Ra: 1 Ом, 2 или 3Вт
Rc: 10 Ом, 3Вт
C1 0,005 — 0,02 мкФ, 1500В
Gr = 10 Ом, 10Вт, проволочный. Для напряжения ≥ 3 кВ необходимо включать два резистора последовательно

Антипаразитная цепь выполнена из нихромовой проволоки диаметром 1мм и двух параллельных проводников, расположенных на расстоянии 1 см друг от друга. Нижний проводник имеет петлю диаметром 6мм, расположенную в середине.

*Рис 10*

порционально выходному сопротивлению нагрузки лампы усилителя. Высокое сопротивление нагрузки означает большое усиление напряжения, а низкое — малое. Если усиление напряжения на УКВ лампой усилителя сделано достаточно низким с помощью снижения выходного нагрузочного сопротивления на УКВ, то усиление напряжения усилителя на УКВ также будет низким, и он не сможет генерировать на УКВ.

Если к аноду лампы подсоединен высокодобротный проводник-контур, то через анодную емкость, соединенную на УКВ с землей, образуется высокодобротный параллельный резонансный контур. Емкостью в этом параллельном резонансном контуре будет являться выходная емкость лампы, а индуктивностью — индуктивность, образованная отрезками соединений анодной цепи с емкостью анодного контура. Высокодобротный параллельный резонансный контур ведет себя как очень большое сопротивление на частоте собственного резонанса. Если же усилитель имеет очень высокое выходное сопротивление нагрузки и очень большое усиление напряжения на УКВ резонансной частоте, это сильно увеличивает вероятность возникновения паразитной генерации на УКВ.

Низкодобротный параллельный резонансный контур будет иметь относительно низкое сопротивление на резонансной частоте. Если два низкодобротных параллельно включенных проводника имеют немного отличающуюся индуктивность и подключены к выходной емкости, то двухрезонансный эффект будет создавать даже меньшую добротность. Это такой же эффект широкополосности, который получается при настройке первичной и вторичной обмоток ВЧ трансформатора на разные частоты.

Этот метод эффективно уменьшает добротность и снижает сопротивление контура на УКВ, что, в свою очередь, снижает коэффициент усиления по напряжению. Задача цепей подавления — уменьшить петлевое усиление на УКВ снижением добротности, уменьшая сопротивление нагрузки на УКВ так, чтобы лампа перестала генерировать.

Типовая антипаразитная цепь состоит из двух низкодобротных параллельных цепей: проводник и индуктивность. Проводник — это низкоомный резистор, создающий путь для тока при

малой индуктивности. Индуктианость — это катушка из нихрома с малой добротностью.

В редких случаях источником паразитной генерации является собственный резонанс на УКВ анодного или накального дросселей. Эта проблема может быть решена с помощью УКВ-аттенюаторов, которыми являются ферритовые кольца или «бусины» с $\mu = 1000$, одетые на каждый вывод накального дросселя, а в анодном дросселе это эффективно решается последовательным включением проволочных резисторов мощностью 10÷15 *Вт* в начало и конец обмотки дросселя.

## РАЗРАБОТКА ЦЕПЕЙ ПОДАВЛЕНИЯ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ

Простейший тип подавителя — резистор. Он уменьшает добротность, увеличивая сопротивление потерь. Их применение эффективно, но только при малых уровнях мощности. Традиционные подавители паразитных колебаний с нестабильной частотой имеют два преимущества перед резистивными — они выдерживают существенно больший ток и заставляют УКВ резонанс «работать против себя».

Подавители паразитных колебаний с нестабильной частотой обычно состоят из катушки индуктивности и резистора с малой индуктивностью. Ось катушки параллельна резистору. Работает такой подавитель следующим образом: магнитное поле тока, текущего через резистор, перпендикулярно направлению тока. Магнитное поле катушки параллельно направлению тока. Взаимная перпендикулярность магнитных полей приводит к тому, что катушки работают независимо друг от друга. Получается, что две катушки независимо подключены к постоянной емкости, т. е. к аноду. Т. к. катушка имеет бóльшую индуктивность, чем резистор, она создает второй УКВ резонанс на более низкой частоте, чем образованная индуктивностью резистора. Это расширяет полосу анодного УКВ резонанса и понижает *Q* подобно тому, как взаимно расстроенные связанные контуры в трансформаторах ПЧ расширяют полосу пропускания приемника. Уменьшение добротности на УКВ уменьшает параллель-

ное сопротивление анодной нагрузки на этих частотах, уменьшает усиление и понижает вероятность самовозбуждения усилителя. Выбор оптимальной индуктивности катушки подавителя лучше всего произвести экспериментально, включая усилитель на 10 *м* диапазоне. Из-за того, что 10 *м* — это уже почти УКВ диапазон, устройство, которое должно подавлять УКВ колебания, должно нагреваться при прохождении ВЧ тока на этом диапазоне. Если индуктивность мала — резистор практически нагреваться не будет, если же велика — резистор перегреется и сгорит.

Любой прямолинейный проводник имеет индуктивность, пропорциональную его длине. Мощные т.н. «безындукционные резисторы» имеют значительную длину и, следовательно, какую-то индуктивность, которая слишком велика для использования в подавителях излучения на УКВ. Проще изготовить такой резистор из нескольких параллельно включенных отрезков провода из нихрома, разнесенных на некоторое расстояние.

Подавители паразитных колебаний с нестабильной частотой могут быть изготовлены и без резистора путем параллельного соединения двух нихромовых проводов с различной индуктивностью. Например, серебрёная шина в анодной цепи как источник возможных неприятностей может быть заменена низкодобротной цепью, состоящей из двух параллельных нихромовых проводов. Один из них должен быть на ≈25% длиннее, чем необходимо для данного расстояния. Его геометрическую длину можно уменьшить, свернув часть провода в маленькую катушку в 1÷2 витка. Ось катушки должна быть параллельна оси второго провода. Такое расположение устранит взаимодействие магнитных полей катушки и прямого отрезка. Для мощных усилителей такие подавители используются практически всегда, т. к. найти мощные резисторы с малой индуктивностью трудно. В очень мощных усилителях подавители изготавливаются из плоской нихромовой шины из-за того, что ВЧ токи в цепи между анодом и конденсатором настройки весьма велики (рис. 10).

Если в усилителе используются две лампы и, соответственно, две цепочки подавления, магнитная связь между ними тоже может привести к паразитному УКВ самовозбуждению. В этом

случае для устранения связи катушки подавителей располагаются под углом 90°. При параллельности катушек из-за особенностей конструкции необходимо намотать их в противоположных направлениях и разнести в пространстве на максимально возможное расстояние.

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ПОДАВЛЕНИЯ УКВ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Некоторые радиолюбители и даже инженеры не верят, что в усилителях КВ диапазона может быть самовозбуждение на частотах УКВ. Это можно понять, потому что наиболее часто возникающее и самое тяжелое по последствиям УКВ самовозбуждение (особенно т. н. ударное) длится микросекунды. Двухтактное паразитиое самовозбуждение возможно только в многоламповых усилителях. Результатом являются устойчивые колебания между анодами. Двухтактные колебания характеризуются очень большой мощностью, рассеиваемой на аноде, средними токами анода и сетки при отсутствии внешиего возбуждения и отсутствием пробоев. Прекратить их можно, заперев лампу усилителя (переключив усилитель в режим приема). Однако это бесполезно при ударном возбуждении, т. к. процесс заканчивается до того, как оператор услышит звук пробоя. Паразитные УКВ колебания возникают неожиданно. Может пройти несколько импульсов анодного тока, прежде чем возникнут паразитные колебания. Даже несмотря на то, что нет никаких научных подтверждений в доказательство этого, фраза «CQ contest» может произвести такую серию импульсов анодного тока — особенио, если contest один из самых ожидаемых, а местный магазин радиодеталей только что закрылся до понедельника.

Определяющим фактором при возникновении паразитного самовозбуждения на УКВ является усиление лампы (или ламп), установленных в усилитель. Даже у новых ламп одного производителя и из одиой партии усиление на УКВ может отличаться. Лампы, у которых такое усиление ниже среднего, могут никогда не проявлять склонности к самовозбуждению даже без

соответствующих мер предосторожности, и при установке таких ламп складывается впечатление, что усилитель чрезвычайно стабилен. В саязи с тем, что обнаружить паразитные излучения обычно имеющимися у радиолюбителей приборами затруднительно, следует использовать аналитический подход. Разумно предположить, что резонансные цепи, поддерживающие колебания, могут быть обнаружены и оценены с помощью ГИРа. Для определения частоты паразитного резонанса и оценки эффективности подавителя необходимо отключить усилитель от сети и измерять частоту резонанса анодной цепи ГИРом. Наилучшее место для измерения — в месте расположения разделительного анодного конденсатора. Резонансная частота обычно изменяется обратно пропорционально мощности усилителя. Анодная цепь однолампового усилителя мощностью 700 *Вт* резонирует в области от 100 до 150 *МГц*, 1500 *Вт* усилитель — от 80 до 140 *МГц*, а 100 *кВт* усилитель — от 35 до 45 *МГц*. При изменении емкости конденсатора настройки эта частота изменяется на несколько *МГц*. Иногда этот резонанс бывает настолько острым и глубоким, что может даже сорвать колебания генератора ГИРа. В этом случае необходимо увеличить расстояние от анодной цепи, т. е. уменьшить связь для тщательного исследования резонанса. Если он широкий и неглубокий — это хорошо. Острый и глубокий резонанс свидетельствует о том, что анодная цепь имеет высокую добротность *Q* на УКВ. После установки подавителя для снижения добротности следует снова проверить резонанс. При этом частота не должна сильно измениться, а резонанс стать широким и неглубоким. Для более точных измерений можно измерять расстояние от катушки ГИРа до анодной цепи линейкой при одинаковом изменении показаний прибора. Уменьшение этого расстояния указывает на уменьшение добротности и, следовательно, вы на правияьном пути.

Усилитель, в котором на одном или двух диапазонах настройка неустойчива, вероятнее всего нуждается в подавлении паразитных колебаний. Стабильный усилитель имеет плааную и симметричную настройку во всем диапазоне рабочих частот.

Подробная информация о паразитной генерации была опубликована в журнале «QST» № 9,10 за 1990 год.

## НАСТРОЙКА ЦЕПИ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ

Задача нейтрализации — изолировать анод от сетки на рабочей частоте. Цепь нейтрализации предотвращает самовозбуждение и обычно настраивается один раз.

1. Выключить усилитель из сети.
2. Временно отключить цепь П-контура от разделительного конденсатора.
3. Установить безындукционный резистор с сопротивлением, эквивалентным Roe (анодная нагрузка, обычно 1÷4кОм), вместо контура и параллельно ему осциллограф или ВЧ вольтметр.
4. Включить усилитель в сеть и подать питание на реле «прием-передача», накал и сетку. Анодное и экранное напряжения не подавать.
5. Подать возбуждение на 20-ти или 15-ти метровом диапазоне. Настроить переменную индуктивность в цепи сетки по минимальному значению КСВ иди по минимальной отраженной мощности. Если необходимо, подобрать напряжение на управляющей сетке таким, чтобы не было сеточного тока.
6. Настроить емкость нейтрализации на минимальное значение ВЧ напряжения на нагрузочном резисторе. При необходимости произвести согласование по входу для получения наилучшего значения КСВ в случае его ухудшения и снова подобрать емкость нейтрализации. На этом процедура нейтрализации завершена. Проверить ее можно на других диапазонах, и при этом ВЧ напряжение не должно сильно изменяться. Обычно никаких подстроек после этого делать не нужно, даже при замене лампы.
7. Уберите резистор (эквивалент Roe) и подключите П-контур.

# ПРОВЕРКА РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

Настройка усилителя класса AB1 может вначвле показаться сложной, но после того как вы проделаете это несколько раз, вы начнете понимать смысл каждого действия, и делать это станет легче.

## НАСТРОЙКА УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

1. Выключить анодное и экранное напряжения. Включите питание реле «прием-передача», накал и сеточное смещение.
2. Подать в режиме CW возбуждение (точки), настраивая входную цепь по минимуму КСВ. Эта настройка компенсирует реактанс в сеточной цепи и одновременно нейтрализует усилитель на рабочей частоте. В случае использования трансивера с транзисторным выходом для предотвращения выхода его из строя при ухудшении КСВ необходимо настраивать сеточную цепь при уровне сигнала не более 5 *Вт*.
3. Подать полную мощность раскачки с помощью передачи точек со скоростью около 250 зн/мин (или при помощи импульсного генератора для настройки). Отрегулировать напряжение на сетке так, чтобы ток сетки был менее 0,1 *мА*. Не используйте регулировку сеточного напряжения для регулировки тока покоя, т. к. основным критерием настройки при работе в классе AB1 должно быть отсутствие сеточного тока при максимальной раскачке. Начальный ток анода можно

регулировать изменением напряжения на экранной сетке при отсутствии возбуждения.

4. При использовании переменной индуктивности и переменного анодного конденсатора установить необходимые значения в соответствии с расчетными данными для получения необходимой добротности *Q* на используемом диапазоне. Надо помнить, что анодный конденсатор определяет добротность на рабочей частоте, и основная настройка должна быть сделана с помощью катушки. Окончательная подстройка производится анодным конденсатором, но его емкость не должна сильно отличаться от расчетной.
5. Когда усилитель мощности настроен, анодный ток должен иметь при полной раскачке максимальное значение, чтобы сопротивление нагрузки Rоэ соответствовало расчету. Если анодный ток имеет меньшее значение и нет пропорционального уменьшения анодного напряжения, Rоэ будет очень большим, и последующая настройка контура будет неправильной. Для получения хорошей линейности и выходной мощности усилитель должен быть настроен на оптимальное значение изменения анодного напряжения при нагрузке. Измерение величины тока экранной сетки — наиболее правильный путь при настройке пентодов и тетродов. Если анодное ВЧ напряжение очень велико из-за маяой нагрузки, сеточный ток (и искажения) будет возрастать. Это означает, что мгновенный минимум анодного иапряженил меньше, чем должен быть, и часть электронов попадает на экранную сетку, уменьшал ток анода. Если ток экранной сетки очень маленький, изменение анодного напряжения недостаточное, и это означает, что нагрузка очень большая. Это ведет к уменьшению выходной мощности. Когда выходной колебательный контур настроен правильно, измеритель тока экранной сетки будет немного подрагивать. Это достигается настройкой анодным конденсатором иян подстройкой катушки индуктивности, но не пытайтесь этого добиться при помощи антенного конденсатора.
6. Установить трансивер в телеграфный режим при полной мощности раскачки. Для снижения перегрузки в режиме настрой-

ки используйте телеграфные посылки со скоростью 250 зн/мин. Стандартные точки имеют 50% значение полной несущей и измеритель в сетке показывает примерно половину обычного значения. Использование импульсного генератора даже лучше (рис. 11).

7. Вращая анодный конденсатор или изменяя индуктивность катушки, добейтесь появления тока сетки. Если ток сетки начнет резко возрастать, прекратите настройку, увеличьте нагрузку и продолжайте настройку. Если ток сетки будет слишком мал, необходимо уменьшить нагрузку. Для ламп с катодом прямого накала, подавая точки при полной мощности раскачки, постепенно снижайте напряжение накала, пока выходная мощность не начнет понижаться. Увеличьте напряжение накала примерно на 2%, и это будет оптимальное значение напряжения накала. Это должно быть перепроверено через несколько сотен часов работы. В лампах с косвенным накалом идеальное нвпряжение накала соответствует уровню, минимально рекомендуемому производителем. Ни при каких условиях эти лампы не должны работать с напряжением накала менее минимально допустимого.

## ИСКАЖЕНИЯ СИГНАЛОВ В УСИЛИТЕЛЕ

Хорошо настроенный линейный усилитель дает на выходе увеличенную копию входного сигнала и ничего более. Нелинейный усилитель работает как смеситель, в результате чего появляются искаженил. Интермодуляционные искажения (IMD) являются результатом смешивания двух и более входных частот. Человеческий голос производит широкий спектр частот, и при нелинейном усилении звукового спектра возникает множество комбинационных составляющих, часть которых выходит за пределы полосы подаваемого на вход сигнала. Это называют **splatter.** IMD обычно измеряются одновременно подаваемыми, одинаковыми по амплитуде безгармониковыми модуляционными сигналами, например 2 *кГц* и 2,2 *кГц*. Когда две или более частоты смешиваются, онн создают побочные сигналы как результат сло-

Для манипуляции положительным напряжением
(трансиверы с транзисторным выходом).

7 8 4

555

3

330 кОм

R1,
160 кОм

6 2 1

0,01 мкФ
керамический
дисковый

6В, 4х1,5В

0,1 мкФ
пленочный или
танталовый

к разъему
телеграфного ключа

+

Q1

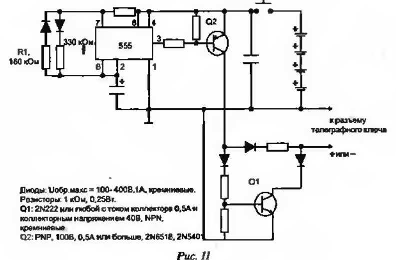



*Рис. 11*

жения и вычитания этих частот. В данном случае это 4,2 *кГц* и 200 *Гц*. Первый уровень смешивания создает так называемый «продукт третьего порядка». Дополнительные продукты, создаваемые «продуктами третьего порядка» образуются при смешивании с двумя основными частотами. Например, 2,2 *кГц* и 4,2 *кГц*, смешиваясь, создают сигнал на частоте 6,4 *кГц*. Когда продукты искажений расположены внутри основной полосы AM или SSB передатчика, появляются искажения, которые уменьшают разборчивость. Продукты искажений нечетных порядков, которые расположены вне полосы излучения, могут быть источником помех на близлежащих частотах.

Существует два метода измерений интермодуляционных искажений. При первом методе, А, уровень мощности IMD сравнивается с одним из двух одинаковых по амплитуде входных сигналов. Соотношение выходной пиковой мощности к мощности любой из двух одинаковых по амплитуде синусоид 4:1 или 6 *дБ*. При втором методе, В, уровень IMD сравнивается с уровнем выходной пиковой мощности. Таким образом, уровень IMD, измерянный по методу А, составляет −34 *дБ*, а уровень IMD, измерянный по методу В, соответственно, −40 *дБ*. Радиолюбители обычно используют при измерении IMD вариант В, потому что S-метры приемников реагируют на пиковую мощность. В промышленной же аппаратуре используется метод А, а для измерений используется анализатор спектра. При использовании анализатора спектра искажения могут быть в дальнейшем разделены на продукты третьего, пятого и седьмого порядков. Тем не менее, метод измерения отношения мощности IMD к пиковой мощности более удобен.

Можно измерить IMD и без дорогого лабораторного оборудования. Нужен лишь приемник и некоторое понимание того, что необходимо для проведения правильного измерения. Сравнивая силу сигнала в основной полосе частот, излучаемых передатчиком, с сияой сигнала на соседних полосах частот, IMD могут быть измерены достаточно точно, даже по эфиру. Значение расстройки принимаемой частоты критично. Если принимаемая полоса расположена слишком близко к основной полосе передатчика, приемник не сможет отделить мощность IMD

от основной мощности. В результате такого перекрытия измереннное значение уровня искажений будет больше реального. Если расстройка принимвемой частоты достаточно велика от основной полосы, то все IMD не попадут в полосу пропускания приемника, и измеренные искажения будут меньше реальных.

Для приемника с двумя последовательно включенными SSB фильтрами, расстройка приемника 3,6 *кГц* достаточна при условии, что приемник установлен на ту же боковую полосу, что и передатчик. Для приемника с одним SSB фильтром необходима расстройка около 4,5 *кГц*. Для измерения уровня IMD на нижней боковой полосе расстройка для приема должна быть выше по частоте. Для измерения IMD на верхней боковой полосе расстройка для приема должна быть ниже по частоте.

В связи с тем, что лишь очень немногие S-метры линейны, необходимой предпосылкой для проведения точных измерений является их калибровка, т. е. составление таблицы соответствия показаний в единицах S уровню сигнала в децибелах. Калибровка может быть проведена при помощи ступенчатого аттенюатора и источника сигнала или сигнал-генератора. Для измерения IMD необходимы две модулирующие частоты. Челоаеческая речь также является хорошим источником сигнала для измерения IMD, потому что в любое мгновение речь включает в себя много основных частот и гармоник.

Прежде чем оценивать продукты нелинейных искажений, надо иметь ввиду, что все SSB, DSB и AM сигналы имеют IMD. Другими словами — все искажено! Обычно вопрос состоит в том, насколько подавлены искажения. Минус 40 dB — очень хорошо, 30 dB — удовлетворительно, а минус 20 dB — очень плохо. Прежде чем сообщить уровень IMD радиостанции, целесообразно было бы знать, желает ияи нет оператор услышать вашу характеристику его сигнала. Обычно большинство радиолюбителей заинтересованы в качестве излучаемого сигнала, некоторые же преднамеренно расстраивают свою аппаратуру для увеличения IMD, но это уже отдельная тема для обсуждения...

# ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

## ALC

Как уже отмечалось ранее, в настоящее время выходнал мощность трансиверов составляет 100÷200 *Вт*. Существуют усилительные лампы, которые могут быть разрушены всего 100Вт подводимой мощности. Хороший пример — лампа ГУ-74Б (3СХ800А7). Раскачивая ГУ-74Б мощностью 100 *Вт*, можно, в конце концов, разрушить катод (катод может осыпаться). Расстояние между катодом и сеткой при перегреве становится опасно малым. Даже пара ГУ-74Б будет перегружена подводимыми 100 *Вт*. Решением является последовательное включение в цепь катода каждой лампы резистора около 40 *Ом* (катодный резистор ООС — отрицательной обратной связи) и, как результат, лампа не будет перекачиваться и входить в нелинейный режим при подводимых 100 *Вт*. Как и следует ожидать, катодный резистор отрицательной обратной связи увеличивает входной импеданс катода. Входное сопротивяение двух ГУ-74 — около 25 *Ом*. С резистором 40 *Ом* в катоде каждой лампы входное сопротивление становитсл около 50 *Ом*. Использование резистора ООС является более предпочтительным, чем использование согласованной пары ГУ-74Б. В схеме с использованием резистора ООС катодные токи автоматически выравниваются и, в отличие от схем ALC, катодные резисторы ООС работают мгновенно, предотвращая характерный недостаток ALC — образование побочных излучений при работа SSB. ALC в схеме усилитель—трансивер работает хорошо только с видами излучения, имеющими постоянный уровень сигнала, такимн как RTTY и ЧМ.

Триоду 3-500Z необходимо примерно 60 *Вт* раскачки. Если лампу 3-500Z возбуждать 100 *Вт* — она перекачивается и возникают искажения. Безындукционный резистор ООС 25 *Ом* делает режим лампы линейным даже при уровне раскачки до 100 *Вт*. Резистор соединяется последовательно с емкостью в катодной цепи возбуждения.

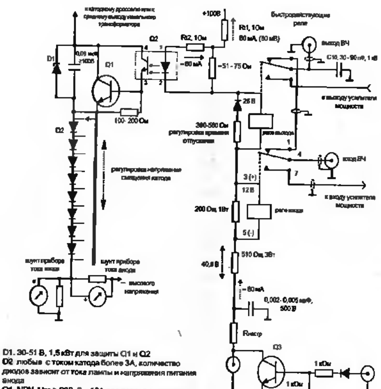
## РЕЛЕ

Обычные реле имеют время переключения около 25мсек. Традиционно они используются в усилителях мощности для переключения напряжения смещения и ВЧ напряжения. Этого было достаточно для трансиверов, в которых также применялись электромеханические реле. В настоящее время трансиверы разрабатываются для таких видов сигналов, как AMTOR, QSK телеграфии и SSB с использованием VOX. Современные трансиверы переключаются из режима «прием» в режим «передача» практически бесшумно и за время не более 5 *мсек*. В таких аппаратах обычно используются т. н. «язычковые» реле с переключающей группой контактов, рассчитанные на большой уровень мощности и включающие антенну на прием или передачу. Такие же реле могут использоваться во входных цепях усилителя. Промышленность выпускает вакуумные реле, которые могут продолжительное время выдерживать ток 7 *А* на частоте 32 *МГц* (2450 *Вт* на нагрузке 50 *Ом*). При использовании схемы ускорения можно добиться времени переключения менее 2мсек. Производятся также вакуумные реле с двумя переключающими группами контактов, однако их быстродействие ниже. Поэтому два отдельных реле с одной переключающей группой контактов на входе и выходе всегда дадут большее быстродействие.

## ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ НА P-I-N ДИОДАХ

Для быстрого переключения с приема на передачу используются также p-i-n диоды. Они, подобно высоковольтным выпрямительным диодам, имеют высокое обратное пробивное напря-

**Высокоскоростной переключатель (2ms) для усилителей с заземленной сеткой**




D1. 30-51 В, 1,5 кВт для защиты Q1 и Q2
D2 любые с током катода более 3А, количество диодов зависит от тока лампы и напряжения питания анода
Q1 NPN, Uкэ ≥ 80В, Ik= 10А для переключения анодного тока более 3А
Q2:оптрон PS2501-1, PS2505-1 или подобные Uкэ ≥ 80В, срабатывание 6 мкс
Q3. Uкэ ≥ 80В, Ik=0,5А
Все немаркированные диоды выбираются для I≥1А, Uобр 100 В

*Рис.12*

женне и широко используются в радиолокационной технике для переключателей прием-передача. Диоды со структурой p-i-n выключаются при подаче на них обратного запирающего напряжения, а включаются — при пропускании прямого тока и имеют чрезвычайно малое время переключения. Обратное пробивное напряжение для них около 1000 *В*. Усилитель с выходной мощностью до 2 *кВт* развивает на нагрузке удвоенное пиковое напряжение не более 800 *В*, поэтому p-i-n диод с обратным напряжением 1000 *В* обеспечивает необходимый запас по напряжению. Если сопротивление нагрузки выше и КСВ существенно отличается от 1,0, напряженне на переключателе может превысить 1000 *В*. Это не опасно для обычных быстродействующих вакуумных реле. Даже если напряжение на контактах превысит пробивиое, маловероятно, что реле выйдет из строя. К полупроводниковым приборам, к сожалению, это не относится. Мгновенное превышенне максимального напряжения пробивает диод (рис. 12).

Для работы CW со скоростью до 150 зн/мин, AMTOR и SSB с быстродействуюшим VOX'ом можно применять вакуумные реле, но при работе CW с использованием компьютера со скоростью 500 зн/мин единственным выходом является применение p-i-n диодов.

## ПАРАМЕТРЫ ЛАМП

Традиционно радиолюбители имели предвзятое отношение к параметрам ламп, которые публикуют производители. В то же время некоторые максимально допустимые величины могут быть превышены в разумных пределах, а превышение других может привести к очень нежелательным последствиям. Примерами параметров, которые не должны быть превышены в лампах с косвенным накалом, являются минимальное напряжение накала и максимум анодного тока. Результатом нарушения этих предельно допустимых значений может стать разрушение катода. Катоды ламп прямого накала более прочные. Максимальное значение анодного тока в лампах с прямым накалом определяется условием линейности, а не максимальной эмиссией катода. Один параметр, который никогда не должен быть превышен, это максимально допустимая температура цоколя лампы, и об этом следует помнить, если венилятор обдувает лампу не со стороны панельки (катода).

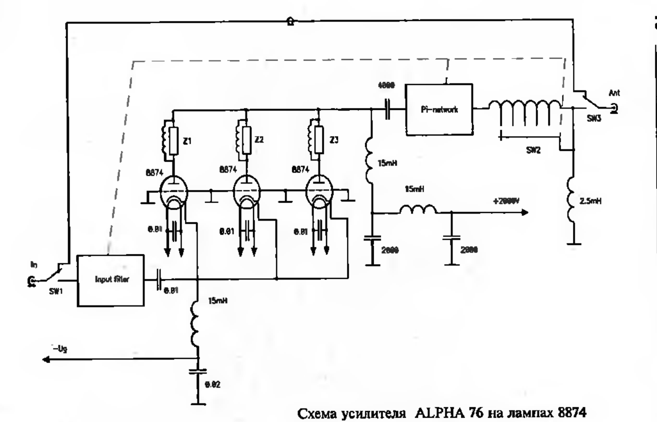



Схема усилителя ALPHA 76 на лампах 8874

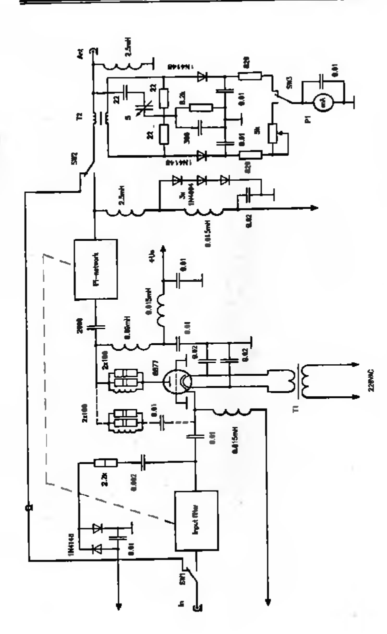



Схема усилителя ALPHA 77 на лампе 8877

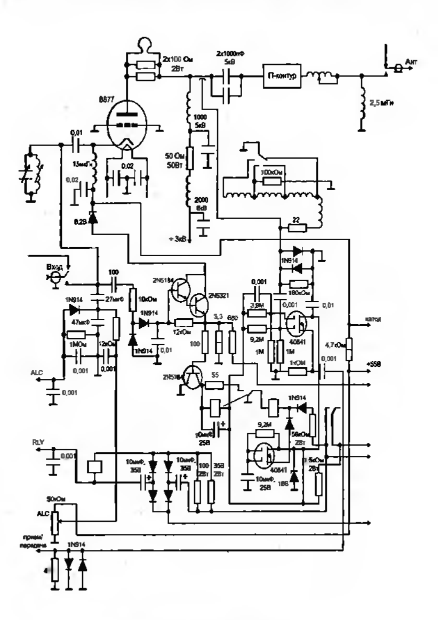



Схема усилителя ALPHA PA-77

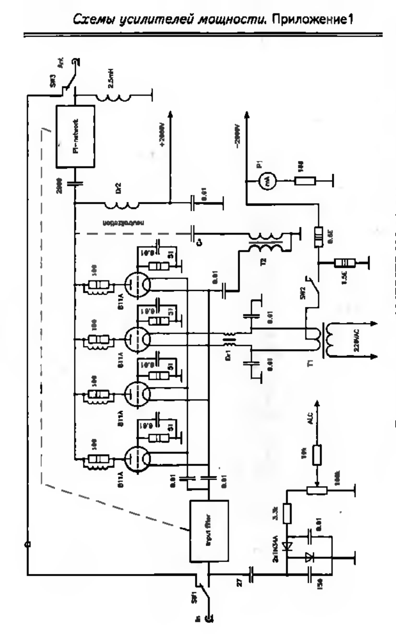



Схема усилителя AMERITRON AL 811 на лампах 811A

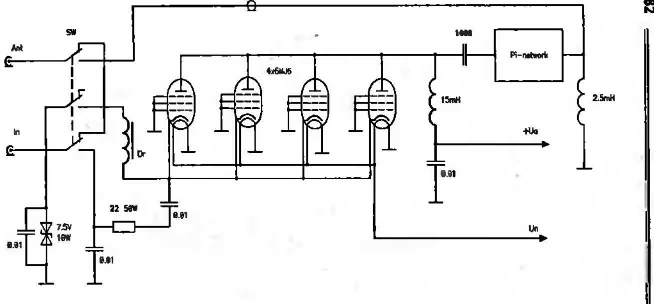



Схема усилителя AMERITRON AL84

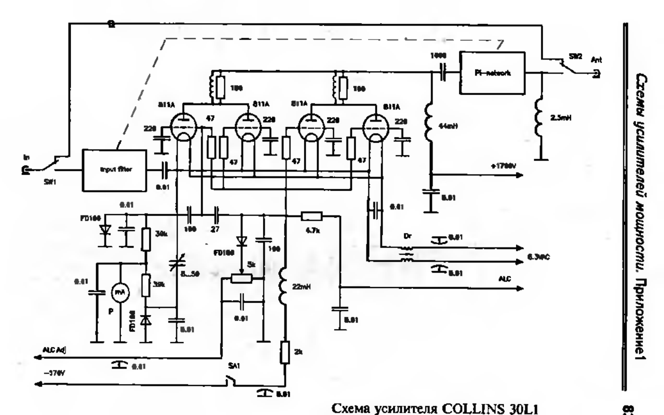



Схема усилителя COLLINS 30L1

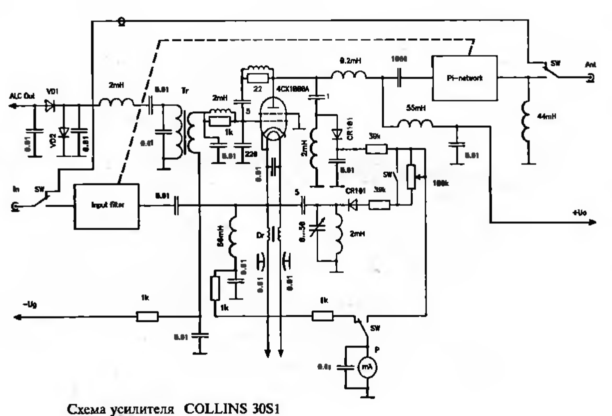



Схема усилителя COLLINS 30S1

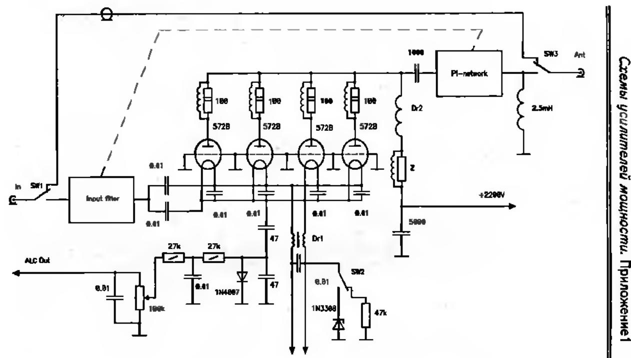



Схема усилителя DENTRON Clipperton L

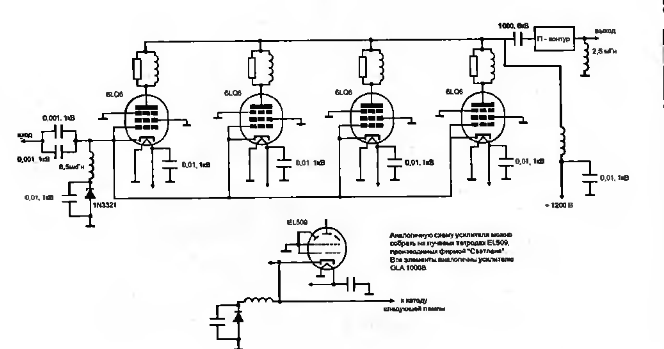



Схема усилителя DENTRON GLA-1000B

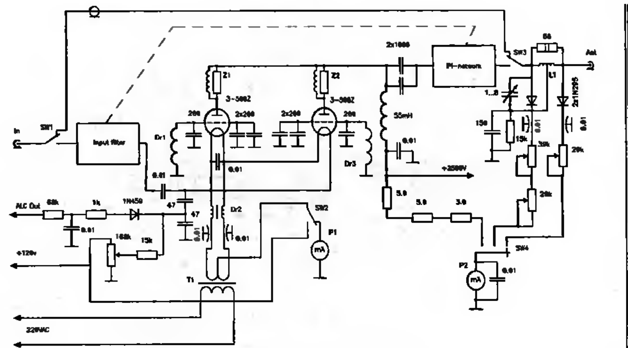



Схема усилителя DRAKE L4B

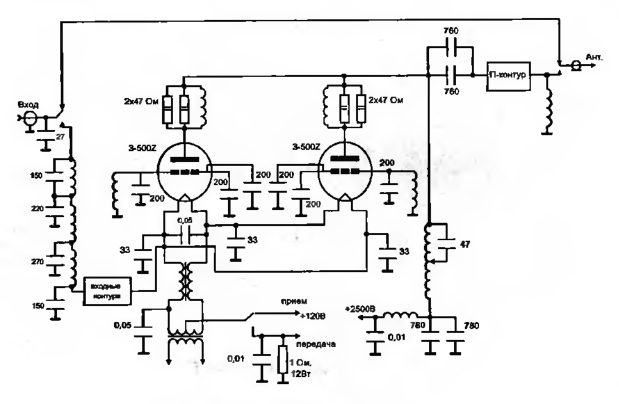



Схема усилителя DRAKE L7

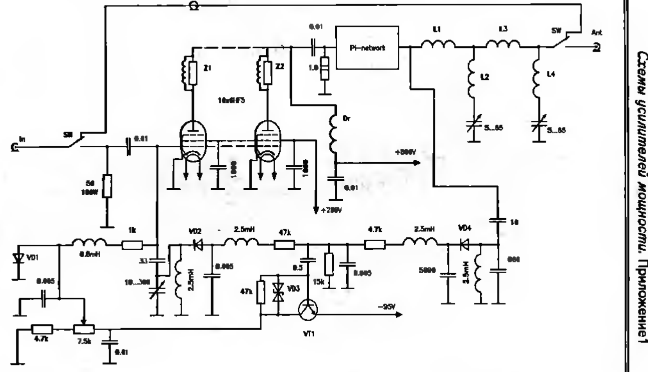



Схема усилителя GALAXY на 10-ти лампах 6HF5

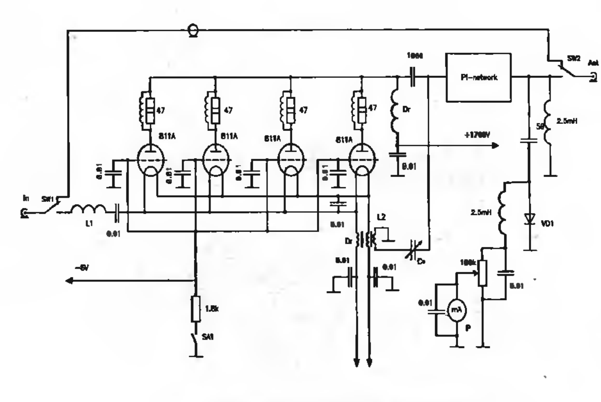



Схема усилителя GONSET на лампах 811A

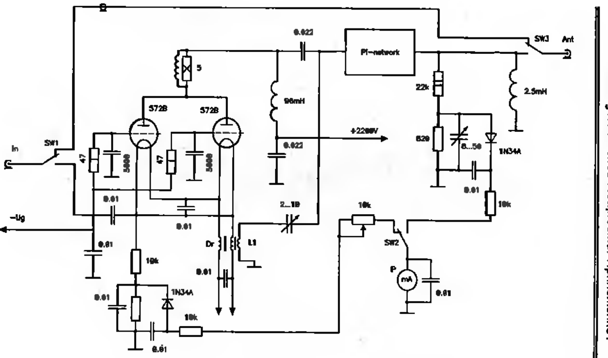



Схема усилителя HAMMARLUND HXL - 1

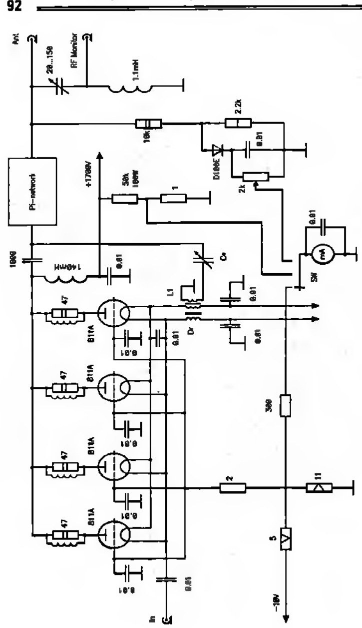



Схема усилителя HEATHKIT HA-10 на лампах 811A

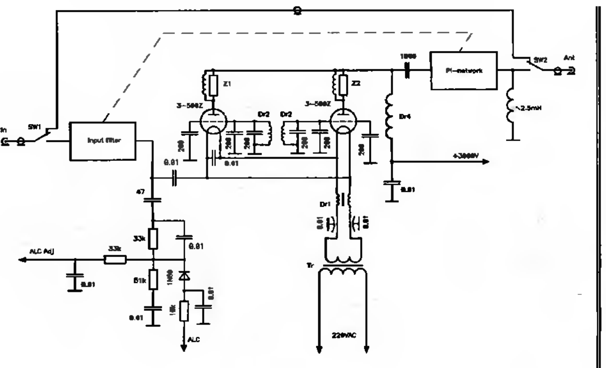



Схема усилителя HEATHKIT SB - 220

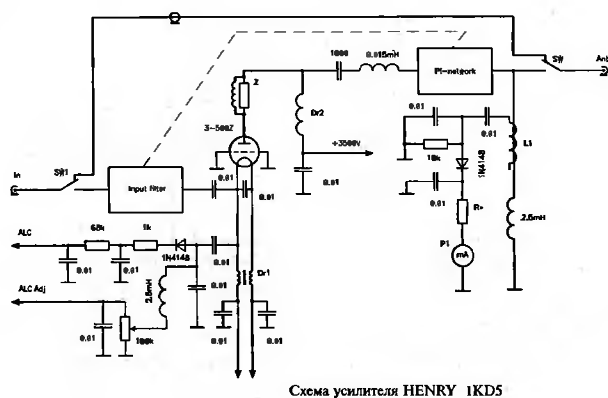



Схема усилителя HENRY 1KD5

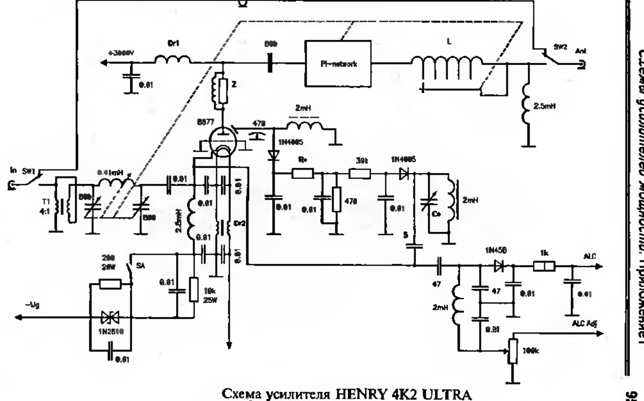



Схема усилителя HENRY 4K2 ULTRA

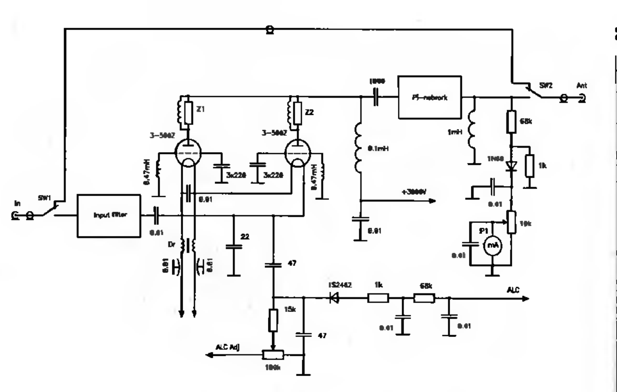



Схема усилителя KENWOOD TL 922

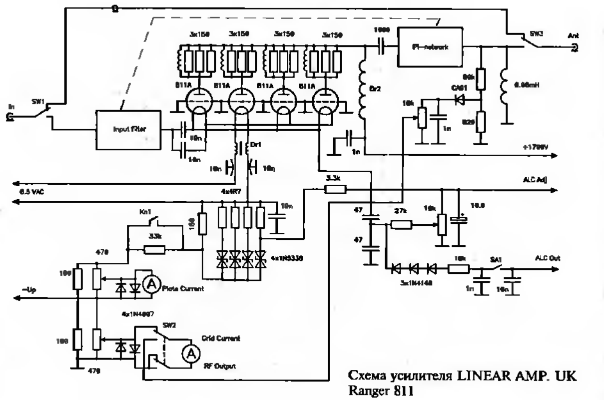



Схема усилителя LINEAR AMP. UK Ranger 811

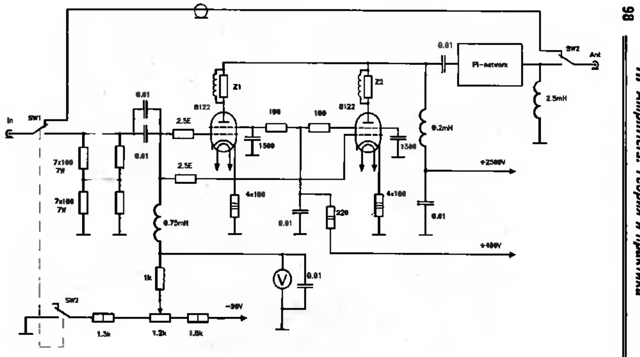



Схема усилителя NATIONAL NCL 2000

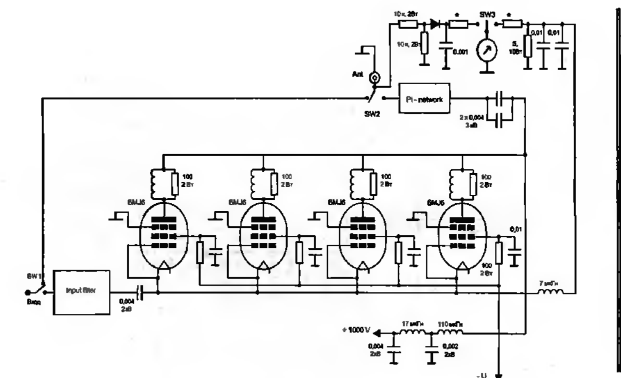



Схема усилителя SWAN 200Z

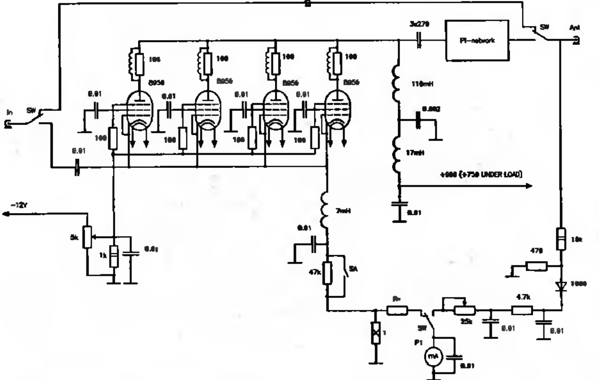



Схема усилителя SWAN Sygnet 1200

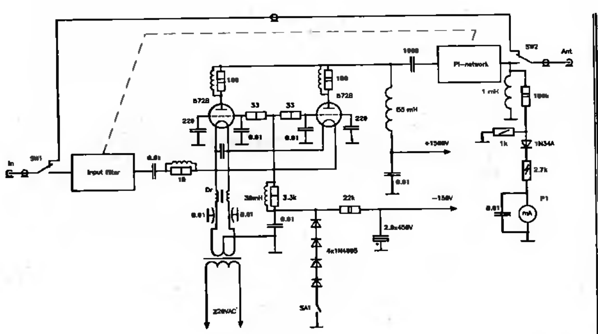



Схема усилителя SWAN 1500N

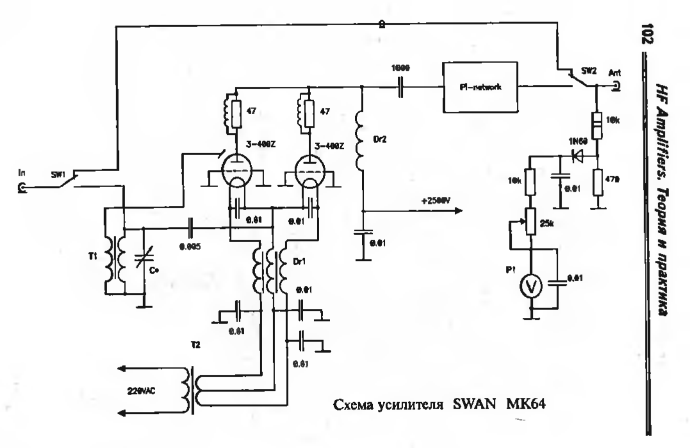



Схема усилителя SWAN MK64

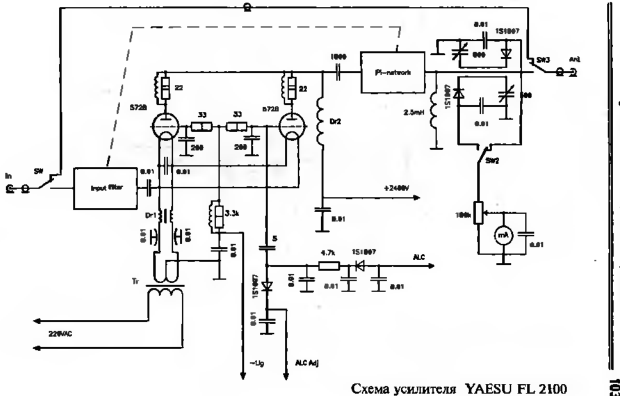



Схема усилителя YAESU FL 2100

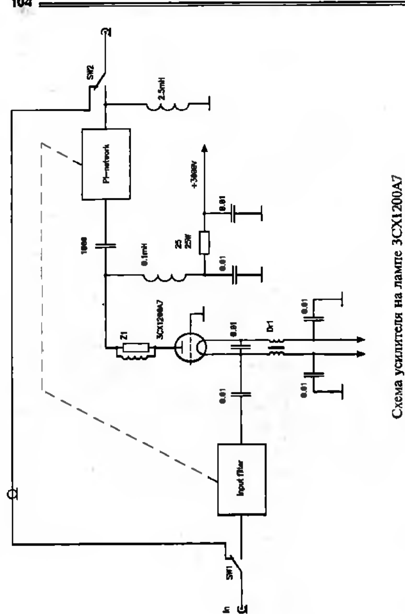



Схема усилителя на лампе 3CX1200A7

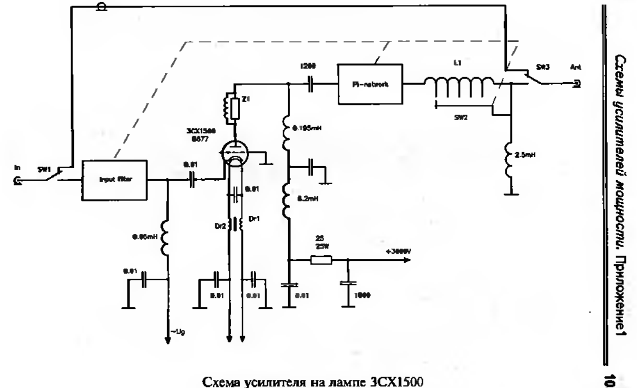



Схема усилителя на лампе 3CX1500

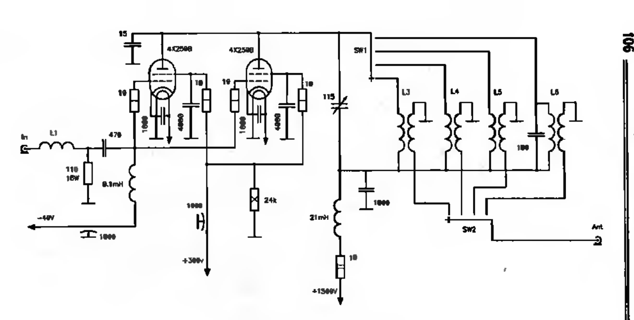



Схема 650 Вт усилителя на лампах 4X250B

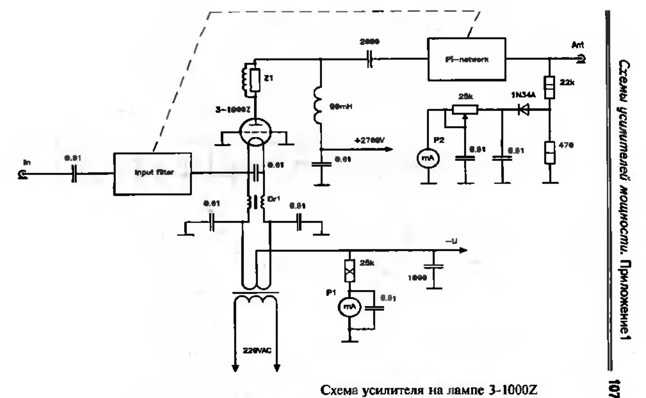



Схема усилителя на лампе 3-1000Z

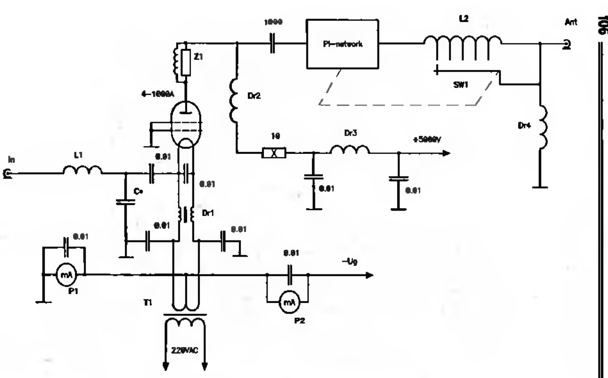



Схема усилителя на лампе 4-1000A

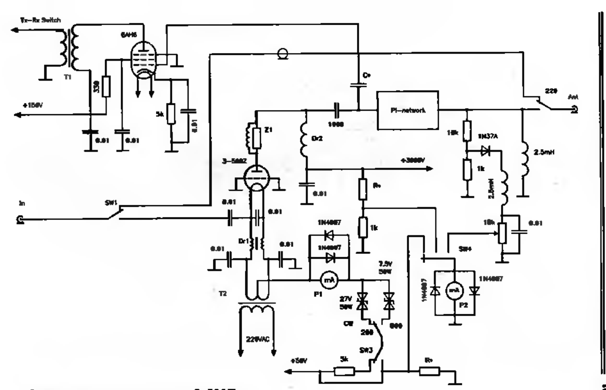



Схема усилителя на лампе 3-500Z

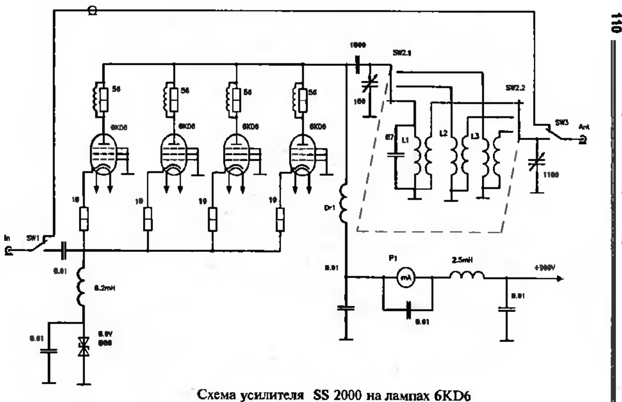



Схема усилителя SS 2000 на лампах 6KD6

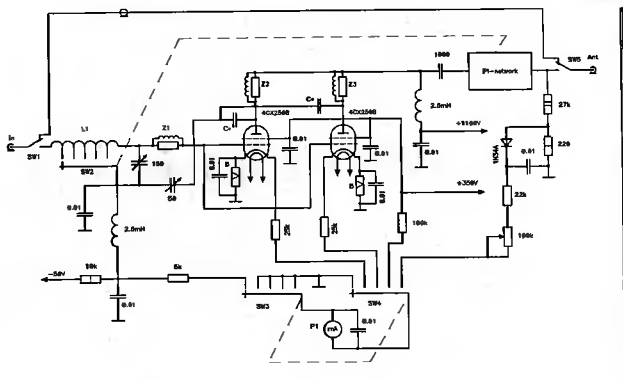



Схема усилителя W7HHF LKA - 1 на лампах 4CX250B

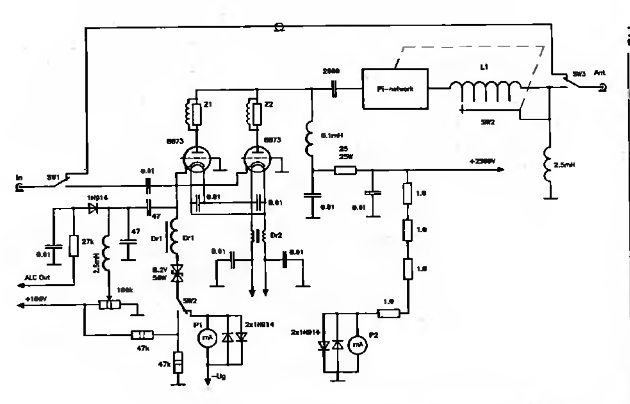



Схема двухкиловаттного усилителя на лампах 8873

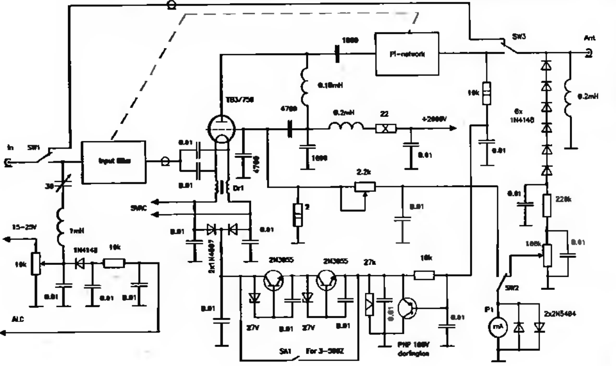



Схема усилителя на лампе ТВЗ/750

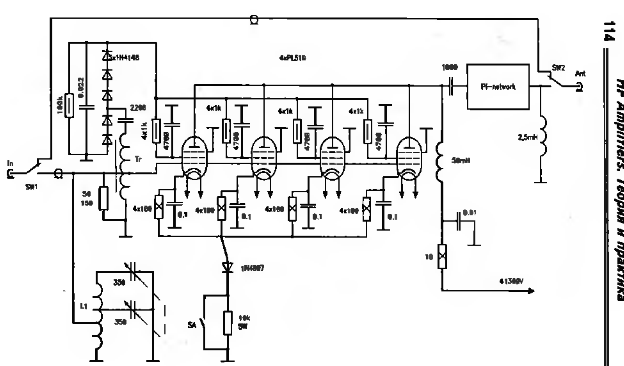



Схема усилителя PA0FRI на лампах PL519

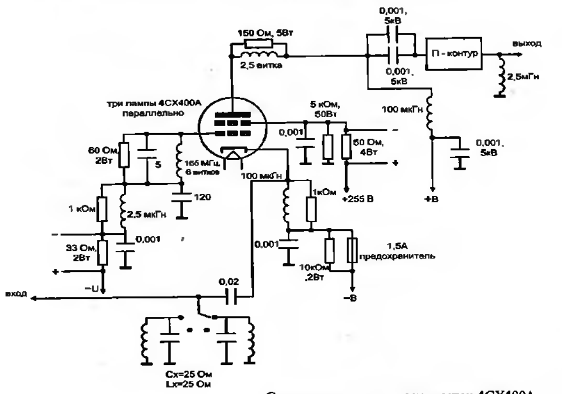



Схема усилителя на трех лампах 4CX400A

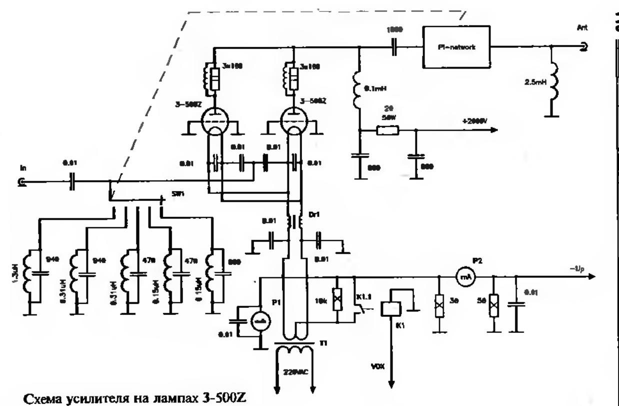



Схема усилителя на лампах 3-500Z

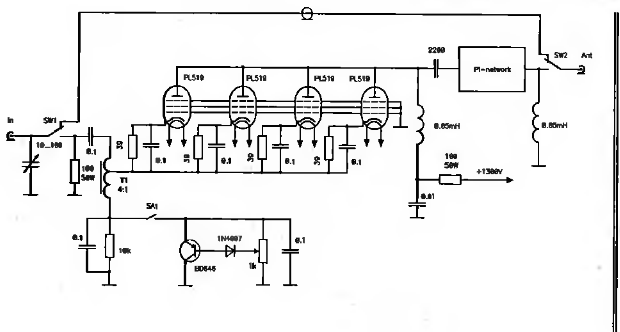



Схема усилителя SM0PVO на лампах PL519

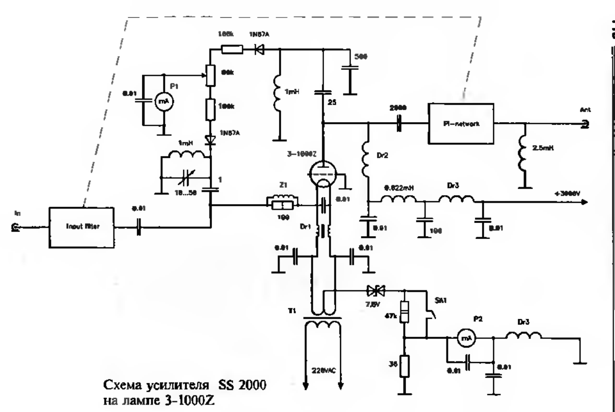



Схема усилителя SS 2000
на лампе 3-1000Z

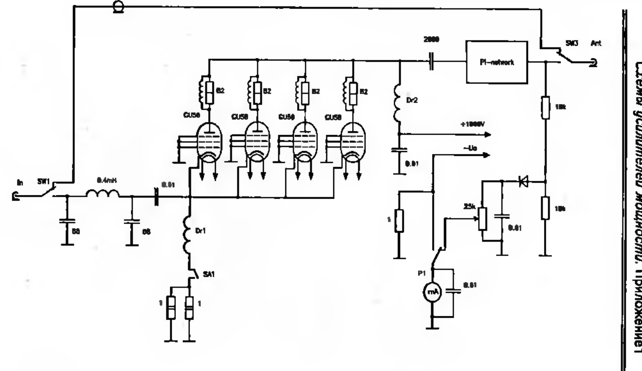



Схема усилителя DK3ID на 4-х лампах ГУ-50

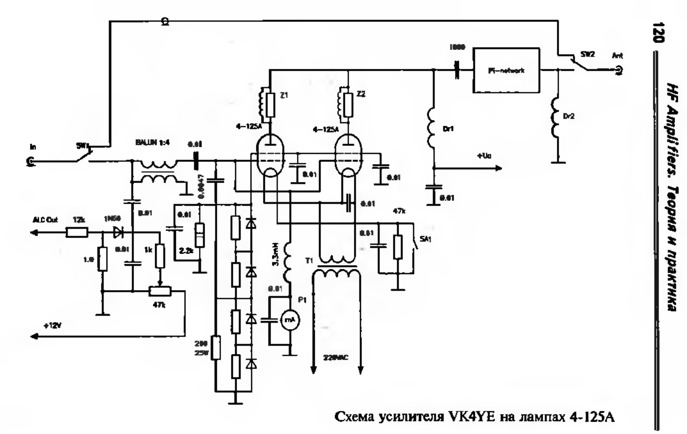



Схема усилителя VK4YE на лампах 4-125A

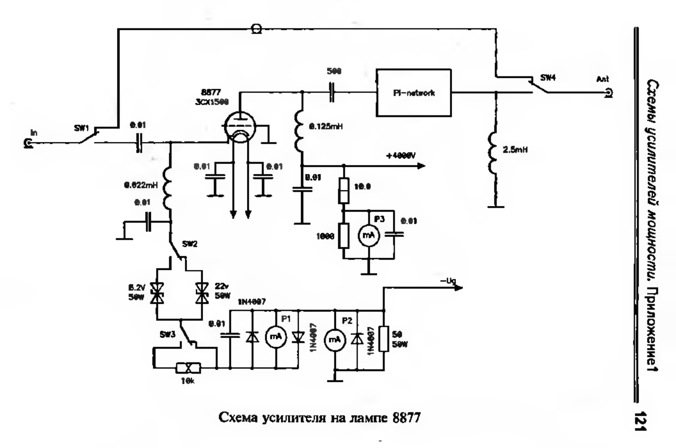



Схема усилителя на лампе 8877

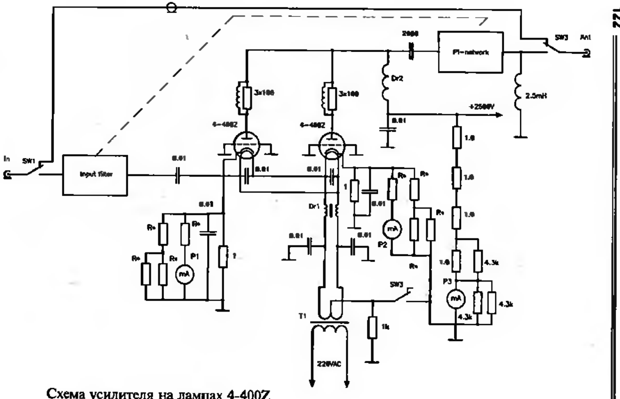



Схема усилителя на лампах 4-400Z

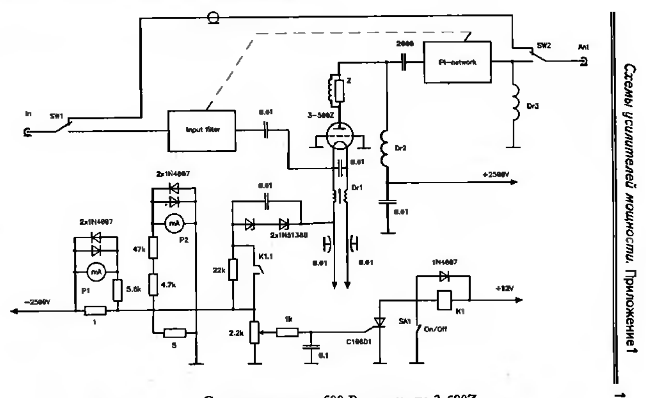



Схема усилителя 500 Вт на лампе 3-500Z

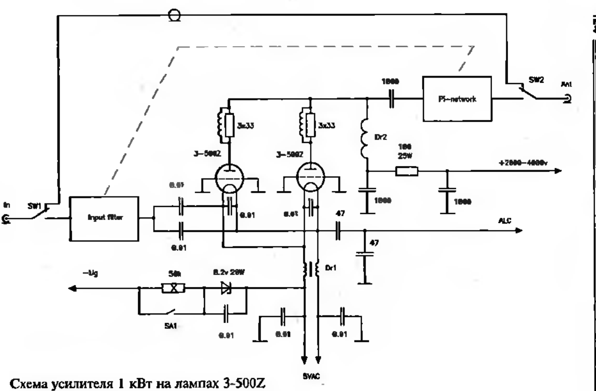



Схема усилителя 1 кВт на лампах 3-500Z

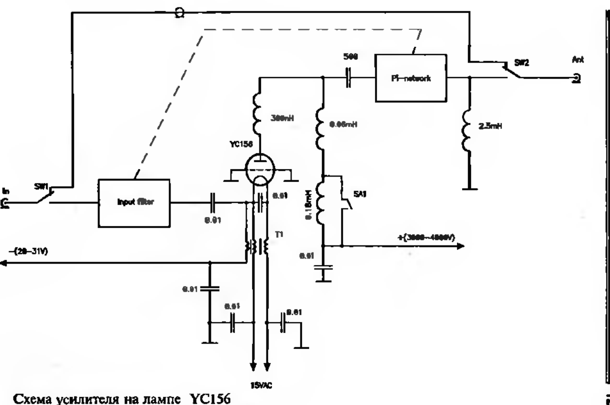



Схема усилителя на лампе YC156

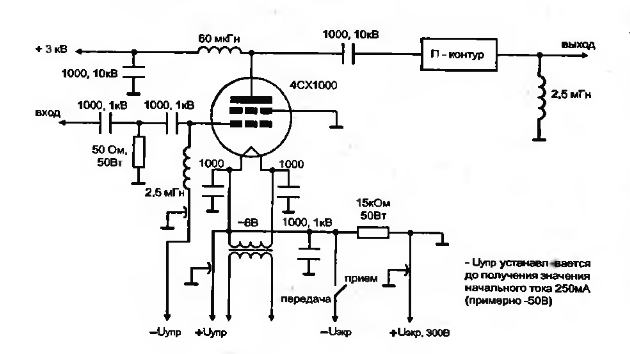



Схема усилителя VE3GK

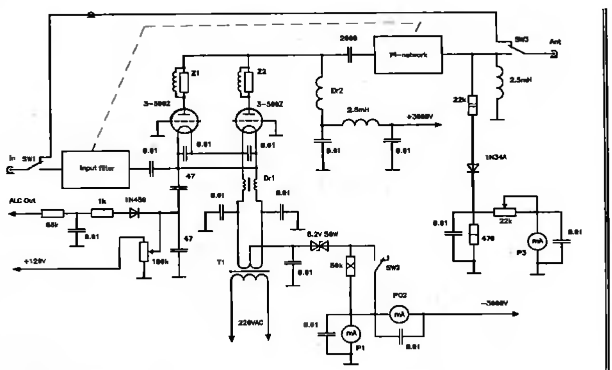


Схема усилителя на лампах 3-500Z

Схема усилителя на лампах 4-250A

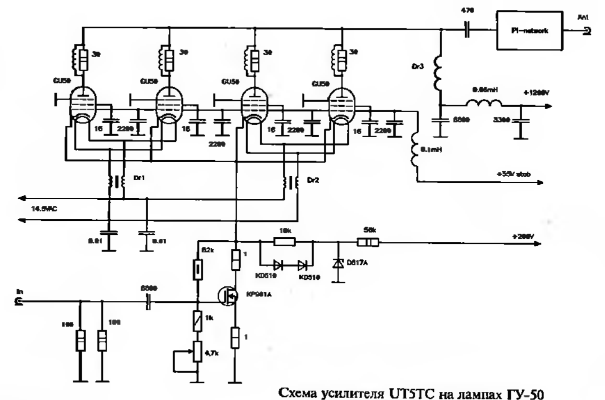



Схема усилителя UT5TC на лампах ГУ-50

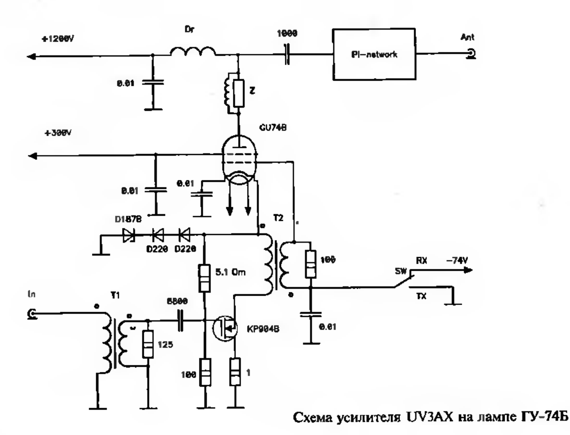



Схема усилителя UV3AX на лампе ГУ-74Б

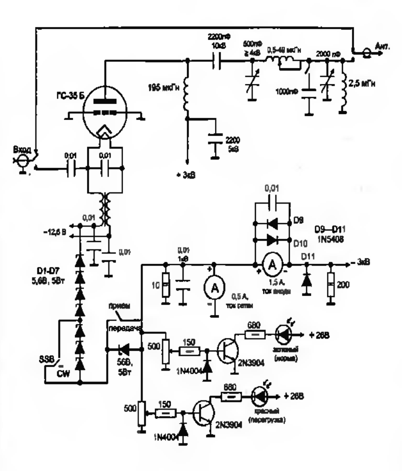



Схема усилителя VK8RH на лампе ГС-35Б

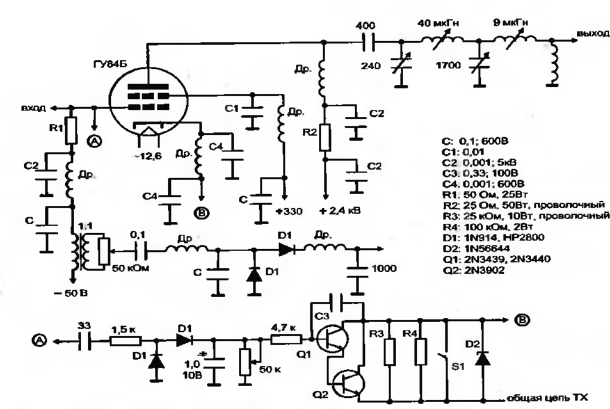



Схема усилителя на лампе ГУ-84Б

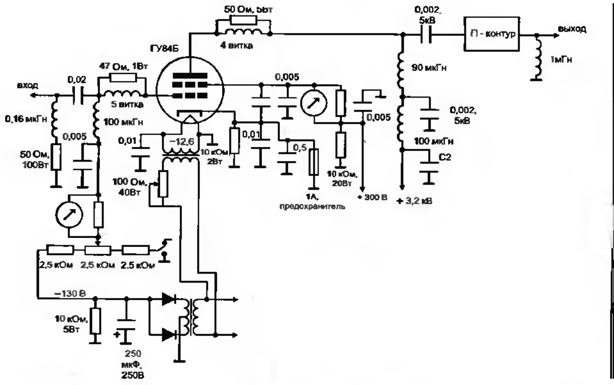



Схема усилителя на лампе ГУ-84Б

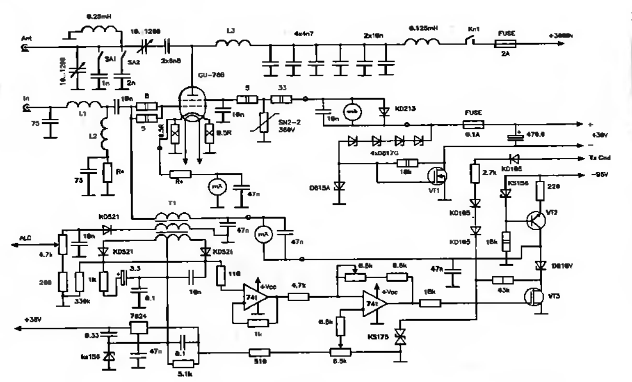



Схема усилителя на лампе ГУ-78Б

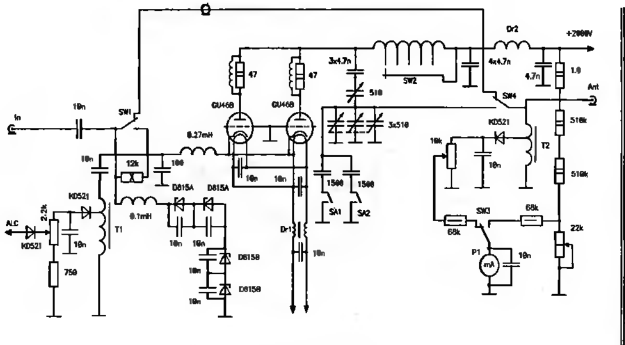



Схема усилителя UA6CR на лампах ГУ-46Б

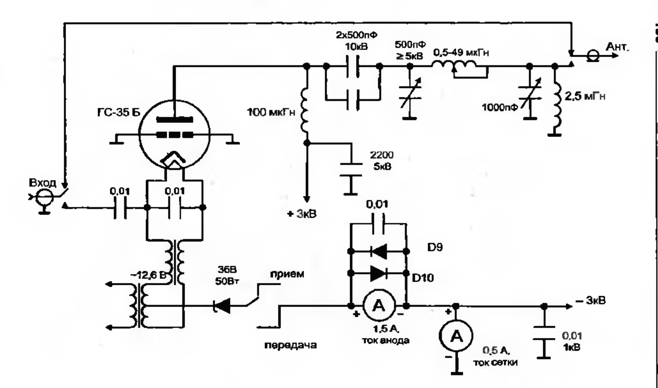



Схема усилителя KB9DB на лампе ГС-35Б

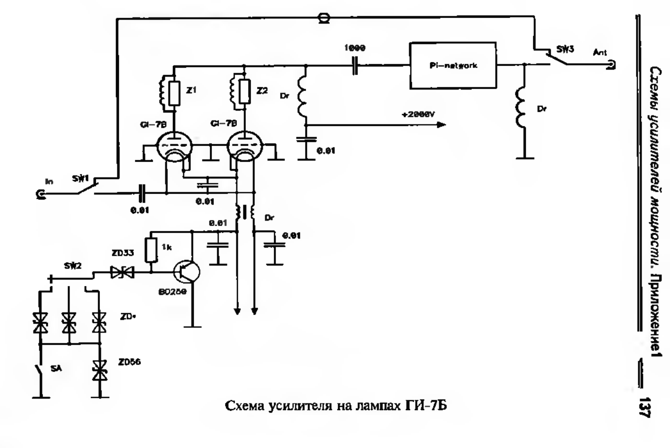



Схема усилителя на лампах ГИ-7Б

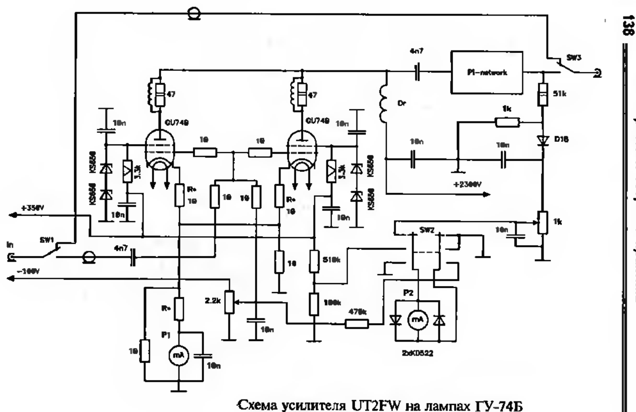



Схема усилителя UT2FW на лампах ГУ-74Б

## РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ П- КОНТУРА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ АНОДНОЙ НАГРУЗКИ

| R1=1500 Ом | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | C1,пФ | C2,пФ | L, мкГн | |
| 160 | 580 | 2718 | 13,9 | |
| 80 | 294 | 1378 | 7 | |
| 40 | 154 | 721 | 3,7 | |
| 30 | 109 | 511 | 2,7 | |
| 20 | 78 | 364 | 1,86 | Q=12 |
| 17 | 61 | 285 | 1,45 | Q=12 |
| 15 | 52 | 243 | 1,24 | Q=12 |
| 12 | 44 | 207 | 1,06 | Q=12 |
| 10 | 38 | 179 | 0,91 | Q=12 |

| R1=1600 Ом | | | |
|---|---|---|---|
| C1, пФ | C2, пФ | L, мкГн | |
| 547 | 2619 | 14,6 | |
| 278 | 1328 | 7,4 | |
| 145 | 695 | 3,9 | |
| 103 | 492 | 2,8 | |
| 73 | 351 | 1,96 | Q= 12 |
| 57 | 274 | 1,53 | Q=12 |
| 49 | 234 | 1,31 | Q=12 |
| 42 | 199 | 1,11 | Q=12 |
| 36 | 172 | 0,96 | Q=12 |

| R1=1700 Ом | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | C1, пФ | C2, пФ | L, мкГн | |
| 160 | 518 | 2527 | 15,4 | |
| 80 | 263 | 1281 | 7,8 | |
| 40 | 137 | 671 | 4,1 | |
| 30 | 97 | 475 | 2,9 | |
| 20 | 69 | 338 | 2,06 | Q=12 |
| 17 | 54 | 265 | 1,61 | Q-12 |
| 15 | 46 | 226 | 1,38 | Q-12 |
| 12 | 39 | 192 | 1,17 | Q=12 |
| 10 | 35 | 173 | 0,99 | Q=12,3 |

| R1=1800 Ом | | | |
|---|---|---|---|
| C1,пФ | C2, пФ | L, мкГн | |
| 491 | 2441 | 16,1 | |
| 249 | 1238 | 8,2 | |
| 130 | 648 | 4,3 | |
| 92 | 459 | 3 | |
| 66 | 327 | 2,16 | Q-12 |
| 51 | 256 | 1,69 | Q-12 |
| 44 | 218 | 1,44 | Q-12 |
| 37 | 186 | 1,23 | Q=12 |
| 35 | 180 | 0,99 | Q-13 |

| R1=1900 Ом | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | C1,пФ | C2, пФ | L, мкГн | |
| 160 | 468 | 2360 | 16,9 | |
| 80 | 237 | 1197 | 8,6 | |
| 40 | 124 | 626 | 4,5 | |
| 30 | 88 | 443 | 3,2 | |
| 20 | 63 | 316 | 2,26 | Q=12 |
| 17 | 49 | 247 | 1,77 | Q-12 |
| 15 | 42 | 211 | 1,51 | Q-12 |
| 12 | 36 | 180 | 1,29 | Q=12 |
| 10 | 35 | 186 | 0,99 | Q=13,7 |

| R1=2000 Ом | | | |
|---|---|---|---|
| C1,пФ | C2, пФ | L, мкГн | |
| 446 | 2284 | 17,6 | |
| 226 | 1158 | 8,9 | |
| 118 | 606 | 4,7 | |
| 84 | 429 | 3,3 | |
| 60 | 306 | 2,36 | Q-12 |
| 47 | 239 | 1,85 | Q=12 |
| 40 | 204 | 1,58 | Q=12 |
| 35 | 184 | 1,29 | Q=12,5 |
| 35 | 193 | 0,98 | Q-14,4 |

| R1=2100 Ом | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | C1,пФ | C2,пФ | L, мкГн | |
| 160 | 427 | 2213 | 18,4 | |
| 80 | 216 | 1122 | 9,3 | |
| 40 | 113 | 587 | 4,9 | |
| 30 | 80 | 416 | 3,5 | |
| 20 | 57 | 296 | 2,46 | Q=12 |
| 17 | 45 | 232 | 1,92 | Q=12 |
| 15 | 38 | 198 | 1,64 | Q=12 |
| 12 | 35 | 189 | 1,3 | Q=13 |
| 10 | 35 | 199 | 0,98 | Q=15,1 |

| R1=2200 Ом | | | |
|---|---|---|---|
| C1, пФ | C2, пФ | L, мкГн | |
| 409 | 2145 | 19,1 | |
| 207 | 1088 | 9,7 | |
| 109 | 569 | 5,1 | |
| 77 | 403 | 3,6 | |
| 55 | 287 | 2,56 | Q=12 |
| 45 | 232 | 2 | Q=12 |
| 37 | 192 | 1,71 | Q=12 |
| 35 | 197 | 1,29 | Q=13,7 |
| 35 | 205 | 0,98 | Q=15,8 |

| R1=2300 Ом | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | C1, пФ | C2, пФ | L, мкГн | |
| 160 | 392 | 2081 | 19,8 | |
| 80 | 199 | 1055 | 10,1 | |
| 40 | 104 | 552 | 5,3 | |
| 30 | 74 | 391 | 3,7 | |
| 20 | 53 | 279 | 2,65 | Q=12 |
| 17 | 41 | 218 | 2,08 | Q=12 |
| 15 | 35 | 186 | 1,77 | Q=12 |
| 12 | 35 | 210 | 1,3 | Q=12 |
| 10 | 35 | 211 | 0,98 | Q=16,5 |

| R1=2400 Ом | | | |
|---|---|---|---|
| C1,пФ | C2, пФ | L, мкГн | |
| 377 | 2020 | 20,5 | |
| 191 | 1024 | 10,4 | |
| 100 | 536 | 5,5 | |
| 71 | 379 | 3,9 | |
| 51 | 270 | 2,75 | Q=12 |
| 40 | 212 | 2,15 | Q=12 |
| 35 | 192 | 1,78 | Q=12 |
| 35 | 207 | 1,3 | Q=14,8 |
| 35 | 216 | 0,98 | Q=17,2 |

| R1=2500 Ом | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | C1,пФ | C2, пФ | L, мкГн | |
| 160 | 363 | 1961 | 21,3 | |
| 80 | 184 | 994 | 10,8 | |
| 40 | 96 | 520 | 5,6 | |
| 30 | 68 | 368 | 4 | |
| 20 | 49 | 262 | 2,85 | Q=12 |
| 17 | 38 | 205 | 2,23 | Q=12 |
| 15 | 35 | 198 | 1,78 | Q=13 |
| 12 | 35 | 215 | 1,29 | Q=15,5 |
| 10 | 35 | 222 | 1,98 | Q=17,9 |

Rн — оптимальное сопротивление нагрузки, Ом
Ua — анодное напряжение, В
Ia — ток анода, А
к — постоянная, выбирается для различных классов

к = 1,3 для класса А
к = 1,5÷1,7 для класса АВ
к = 1,57÷1,8 для класса В
к = 2 для класса С

| Нормы нагрузок проводов по току | | | Расчет диаметра проводов для плавких вставок предохранителей | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Номинальное сечение, кв.мм | Сопротивление 1км провода при 20 С, Ом | Допустимая долговременная нагрузка, А | Ток плавления, А | Диаметр, мм | |
| 0,35 | 58 | 4 | | медь | алюминий |
| 0,5 | 41,3 | 6 | 0,5 | 0,03 | 0,04 |
| 0,75 | 26,8 | 9 | 1 | 0,05 | 0,07 |
| 0,88 | 22,8 | 10 | 2 | 0,09 | 0,1 |
| 1 | 20,5 | 11 | 3 | 0,11 | 0,14 |
| 1,25 | 16,3 | 13 | 4 | 0,14 | 0,17 |
| 1,5 | 13,3 | 14 | 5 | 0,16 | 0,19 |
| 1,93 | 10,42 | 17 | 6 | 0,18 | 0,22 |
| 2,5 | 8 | 20 | 7 | 0,2 | 0,25 |
| 3 | 6,58 | 22 | 8 | 0,22 | 0,27 |
| 4 | 5 | 25 | 9 | 0,24 | 0,29 |
| 5,15 | 3,85 | 32 | 10 | 0,25 | 0,31 |
| 6 | 3,3 | 35 | 15 | 0,32 | 0,4 |
| 8,8 | 2,4 | 48 | 20 | 0,39 | 0,48 |
| 10 | 2 | 50 | 25 | 0,46 | 0,56 |
| 13 | 1,5 | 60 | 30 | 0,52 | 0,64 |
| 16 | 1,2 | 70 | 35 | 0,58 | 0,7 |
| 21 | 0,96 | 30 | 40 | 0,63 | 0,77 |
| 25 | 0,8 | 60 | 45 | 0,68 | 0,83 |
| 35 | 0,57 | 100 | 60 | 0,73 | 0,89 |
| 41 | 0,49 | 125 | 60 | 0,82 | 1 |
| 50 | 0,4 | 145 | 70 | 0,91 | 1,1 |
| 70 | 0,28 | 160 | 60 | 1 | 1,22 |
| 95 | 0,2 | 210 | 60 | 1,08 | 1,32 |

| Размер провода в AWG | Диаметр, мм | Сопротивление 300 м, 25 С, Ом | Размер провода в AWG | Диаметр, мм | Сопротивление 300 м, 25 С, Ом |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 7,348 | 0,1264 | 21 | 0,723 | 13,05 |
| 2 | 6,544 | 0,1593 | 22 | 0,644 | 16,46 |
| 3 | 5,827 | 0,2009 | 23 | 0,573 | 20,76 |
| 4 | 5,189 | 0,2533 | 24 | 0,511 | 26,17 |
| 5 | 4,621 | 0,3195 | 25 | 0,455 | 33 |
| 6 | 4,115 | 0,4028 | 26 | 0,405 | 41,62 |
| 7 | 3,665 | 0,508 | 27 | 0,361 | 52,48 |
| 8 | 3,264 | 0,6405 | 26 | 0,321 | 66,17 |
| 9 | 2,906 | 0,8077 | 29 | 0,286 | 83,44 |
| 10 | 2,588 | 1,018 | 30 | 0,255 | 105,2 |
| 11 | 2,305 | 1,264 | 31 | 0,227 | 132,7 |
| 12 | 2,053 | 1,619 | 32 | 0,202 | 167,3 |
| 13 | 1,828 | 2,042 | 33 | 0,18 | 211 |
| 14 | 1,628 | 2,575 | 34 | 0,16 | 286 |
| 15 | 1,45 | 3,247 | 35 | 0,143 | 335 |
| 16 | 1,291 | 4,094 | 36 | 0,127 | 423 |
| 17 | 1,15 | 5,183 | 37 | 0,113 | 533 |
| 18 | 1,024 | 6,51 | 36 | 0,101 | 673 |
| 19 | 0,912 | 8,21 | 39 | 0,09 | 848 |
| 20 | 0,812 | 10,35 | 40 | 0,08 | 1070 |

| Тип лампы | Мощность, рассеиваемая анодом, макс | Напряжение на аноде, макс | Ток аноде, макс | Напряжение экранной сетки, макс | Предельная рабочая частота | Напряжение накала | Ток накала | Напряжение анода | Напряжение сетки1 | Напряжение сетки2 | Ток анода | Выходная мощность |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Вт | В | мА | В | МГц | В | В | В | В | В | мА | Вт |
| 4CX1800B | 1600 | 3300 | 1600 | 350 | 250 | 12,6 | 4,4 | 2400 | -70 | 250 | 350 | 2086 |
| 4CX1500A | 1600 | 3300 | 1000 | 750 | 150 | 5 | 38,5 | 3000 | -200 | 600 | 600 | 1800 |
| 5CX1500A | 1500 | 3300 | 3300 | 750 | 110 | 5 | 38,5 | 3300 | -200 | 60 | 600 | 3300 |
| 4CX800A | 600 | 3300 | 800 | 250 | 150 | 12,6 | 3,6 | 2200 | -47 | 350 | ПО | 750 |
| 3CX800A7 | 600 | 2500 | 600 | — | 450 | 13,5 | 1,5 | 2200 | -8,2 | — | 600 | 750 |
| 3CX1200A7 | 1200 | 3000 | 600 | — | 110 | 7,5 | 21 | 3300 | — | — | 750 | 1200 |
| 4CX400A | 450 | 3300 | 410 | 600 | 600 | 6,3 | 3,2 | 3000 | -30 | 450 | 400 | 610 |
| 8874/3CX400A7 | 450 | 3300 | 750 | — | 600 | 6,3 | 3 | 3000 | -8,2 | — | 600 | 587 |
| 4CX350A | 250 | 3300 | 600 | 600 | 600 | 6 | 3,4 | 2200 | -27 | 450 | 290 | 250 |
| 4CX250B | 250 | 2200 | 290 | 450 | 600 | 6 | 2,6 | 2200 | -55 | 250 | 250 | 800 |
| 4CX250R | 250 | 2200 | 250 | 600 | 600 | 6 | 2,6 | 3300 | -30 | 40 | 250 | 300 |
| 4X150A | 250 | 3300 | 250 | 400 | 600 | 6 | 2,6 | 3300 | -30 | 350 | 250 | 800 |
| 4X250B | 250 | 3300 | 290 | 450 | 175 | 6 | 2,1 | 3300 | -30 | | 290 | 410 |
| 3-500Z | 600 | 4000 | 450 | — | 110 | 5 | 14,6 | 3300 | -10 | — | 333 | 750 |
| 3-1000Z | 1000 | 6000 | 600 | — | 110 | 7,5 | 20 | 6000 | | — | 600 | 1600 |
| 4-125A | 250 | 3300 | 600 | — | KB | 5 | 6,5 | 3000 | -100 | 600 | 200 | 587 |
| 4-250A | 250 | 4000 | 250 | — | 110 | 5 | 14,7 | 3300 | | | 310 | 600 |
| 4-1000A | 1800 | 3300 | 750 | | 110 | 7,5 | 21,3 | 3300 | | | 333 | 3400 |
| 8560AS | 200 | 3300 | 250 | 450 | 600 | 6 | 2,8 | 3300 | -55 | 600 | 290 | 250 |
| 572B | 150 | 2750 | 275 | — | 30 | 6,3 | 4 | 3300 | -2 | — | 250 | 250 |
| 811A | 60 | 1600 | 175 | — | 30 | 6,3 | 4 | 1000 | -4,5 | — | 167 | 150 |
| 812A | 65 | 1600 | 175 | — | 30 | 6,3 | 4 | 1800 | -120 | — | 170 | 150 |
| 813 | 125 | | | | | 10 | 5 | | | | | 275 |
| 6122 | 450 | | | | 600 | 12,6 | 1,3 | 3300 | — | 250 | 800 | 200 |
| 3300 | 450 | 3400 | 150 | | 600 | 6 | 2,6 | 3300 | | | 800 | 400 |
| EL509/6KG6 | 35 | 1600 | 250 | 200 | 30 | 6,3 | 2,5 | 3300 | -10 | -15 | 200 | 150 |
| 6HF5 | 28 | | | | | 6,3 | 2,25 | 600 | -30 | 140 | 232 | 77 |
| 6KD6 | 33 | | | | | 6,3 | 2,25 | 600 | -11 | 0 | 150 | 82 |
| ГУ-43Б | 1600 | 3300 | 1600 | 600 | 150 | 12,6 | 6,6 | 3300 | 3300 | 250 | 600 | 1600 |
| ГУ-73Б | 3300 | 3300 | 2200 | 800 | 250 | 28 | 4,65 | 3300 | -28 | 600 | 1000 | 2500 |
| ГУ-74Б | 600 | 2000 | 600 | 800 | 60 | 12,6 | 3,6 | 1600 | -24 | 250 | 600 | 600 |
| ГУ-78Б | 3300 | 3300 | 2200 | 600 | 250 | 27 | 4 | 3300 | -30 | 600 | 1000 | 3300 |
| ГУ-84Б | 3300 | 2200 | 3300 | 450 | 250 | 27 | 3,7 | 2000 | -30 | 250 | 3300 | 1600 |
| ГС-35Б | 3300 | 3300 | 1400 | — | 1000 | 12,6 | 2,95 | 3300 | -9 | — | 400 | 600 |


HF
AMPLIFIERS